

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

**EVALUACIÓN DE LA UTILIDAD DE SONDAS DE CAPACITANCIA
PARA LA GESTIÓN DEL RIEGO EN MAÍZ EN ARTAJONA (NAVARRA)**

presentado por

DIEGO SUPERVÍA MAESTRE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

Diciembre 2016

Resumen:

Las sondas de capacitancia son capaces de medir la constante dieléctrica del suelo y con ello determinar los niveles de humedad volumétrica presentes en cada instante. Por lo que este tipo de sondas pueden resultar un buen elemento de control para la gestión del riego de una manera adecuada para los distintos tipos de suelo. Por ello se realizó una evaluación de su utilidad para la gestión del riego en maíz en la zona de Artajona.

Para ello se implantaron cuatro sondas distribuidas en dos tratamientos con dos repeticiones cada uno de ellos. Con dichas sondas se evaluaron los niveles de humedad constantemente para determinar los momentos y dosis de riego del cultivo.

Inicialmente se determinaron unos valores que servirían para establecer los límites, superior e inferior, de la reserva de agua en el suelo y vendrían determinados por la Capacidad de Campo y el Nivel de Agotamiento Permisible respectivamente.

Durante la experimentación se trató de gestionar el riego de tal manera que los niveles de humedad del suelo permanecieran constantemente dentro del intervalo preestablecido. Además, se registraron las dosis de riego que posteriormente se compararían con las recomendaciones del SAR para comprobar el ajuste de las dosis de riego aplicadas a las de la recomendación.

Palabras Clave:

Gestión de riego, sondas, FDR, capacitancia, maíz, Artajona.

Vº Bueno de los tutores del trabajo

El Estudiante

Luis Miguel Arregui Oderiz

Miguel Ángel Campo Bescós

Diego Supervía Maestre

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo Final de Máster se ha realizado en colaboración con la cooperativa de Artajona con el objetivo de adquirir las competencias de Ingeniero Agrónomo que acredita la superación del Máster de Ingeniería Agronómica cursado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra, por lo que me gustaría agradecer a ambas instituciones el poner a mi disposición los recursos humanos y materiales que han hecho posible este ensayo.

A D. Luis Miguel Arregui, codirector del Trabajo de Final de Máster, por su constante apoyo, consejo, paciencia y orientación durante el desarrollo del ensayo.

A D. Miguel Ángel Campo, codirector del Trabajo de Fin de Máster, por su enseñanza, apoyo y orientación en el transcurso del ensayo.

A ambos, Luis Miguel y Miguel Ángel, por confiar en mí para la realización de este ensayo.

A D. Rafael Giménez, profesor del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, por su consejo, ayuda y disposición durante el ensayo.

A Andrea Ayestarán, técnico de la Cooperativa de Artajona, por su inestimable ayuda.

A la Cooperativa de Artajona por darme la posibilidad de realizar el ensayo, por darme los medios y la ayuda del personal necesarios para poder llevar a cabo el trabajo.

A todas aquellas personas que, ya sea de una manera directa o indirecta, han hecho posible la realización de este trabajo.

Quisiera acabar dando las gracias a todas aquellas personas que han estado constantemente apoyándome, ya no solo durante la realización de este trabajo, sino durante todo mi periodo de estudios. Con esto me refiero a toda mi familia y amigos que me han apoyado constantemente y me ha soportado tanto en los buenos como en los malos momentos.

Gracias a todos.

ÍNDICE

1. Introducción.....	6
2. Antecedentes.....	7
2.1.1 Método directo.....	7
2.1.2 Método Indirecto.....	7
2.1.3 Factores del suelo que condicionan el funcionamiento de las sondas	8
2.2 El riego por aspersión.....	8
2.3 Cultivo de maíz	9
3. Objetivos.....	10
4. Material y Métodos	12
4.1 Localización del estudio	12
4.1.1 Características de los hidrantes.....	13
4.2 Diseño experimental	14
4.3 Material Vegetal.....	15
4.4 Estudio de la zona	16
4.4.1 Condiciones climáticas durante el periodo de implantación del cultivo	16
4.4.2 Clase textural del suelo.....	17
4.5 Labores de cultivo	19
4.5.1 Manejo del suelo	19
4.5.2 Productos fitosanitarios aplicados	19
4.5.3 Abonado de la parcela	19
4.6 Instrumentos de medida	20
4.6.1 Funcionamiento de las sondas de capacitancia	20
4.6.2 Sondas instaladas	20
4.6.3 Programa de gestión de datos.....	22
4.7 Riego del cultivo	23
4.7.1 Profundidad de trabajo	23

4.7.2 Gestión del riego.....	23
4.7.3 Criterios de riego	25
4.8 Valores de comparación.....	26
4.8.1 Recomendaciones SAR	26
4.8.2 Riegos de T.Coop	27
4.8.3 Evapotranspiración del cultivo (ETc)	27
4.9 Recolección	28
4.9.1 Análisis estadístico.....	29
5. Resultados y Discusión	29
5.1 Determinación del Almacenamiento de agua en el suelo	29
5.2 Distribución espacial del riego	31
5.3 Calibración de las sondas de humedad.....	32
5.3.1 Valores de humedad del suelo	33
5.4 Gestión del riego	38
5.5 Seguimiento del cultivo.....	44
5.6 Comparación de las programaciones de riego con otros tratamientos	48
5.6.1 ETP calculada	49
5.6.2 Comparación de las dosis de riego aplicadas	50
5.7 Estado del suelo	53
5.8 Rendimiento del cultivo	56
6. Conclusiones.....	58
7. Referencias	58
8. Anejos	59
8.1 Determinación de la humedad del suelo	59
8.1.1 Densidad del suelo.....	60
8.1.2 Humedad gravimétrica calculada	61
8.1.3 Humedad volumétrica	63
8.2 Estados fenológicos.....	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del hidrante gestionado por la cooperativa (Fuente: Aguacanal).....	13
Tabla 2. Características del hidrante gestionado por la universidad (Fuente: Aguacanal)	14
Tabla 3. Descripción climática de Papadakis (Fuente: Estudio climático de Navarra)	16
Tabla 4. Características típicas de humedad para el tipo de suelo (Allen et al., 1998)	25
Tabla 5. Valores de Capacidad de campo para los distintos tramos de profundidad (mm)	29
Tabla 6. Valores del Punto de Marchitez para los distintos tramos de profundidad (mm)	29
Tabla 7. Valores del Intervalo de Humedad Disponible para los distintos tramos de profundidad (mm).....	30
Tabla 8. Valores del Nivel de Agotamiento Permisible para los distintos tramos de profundidad (mm)	30
Tabla 9. Valores de NAP para las distintas zonas de la parcela (mm)	30
Tabla 10. Valores indicativos del intervalo de la humedad del suelo. Capacidad de campo - Límite inferior del intervalo de gestión (mm).....	31
Tabla 11. Consumo de agua de los hidrantes por hectárea	52
Tabla 12. Resultados de la cosecha	56
Tabla 13. Valores de densidad de las distintas zonas de la parcela (gr/cm^3)	60
Tabla 14. Valores medios de densidad y CV de las medias de densidad de los perfiles de profundidad del suelo.....	61
Tabla 15. Valores de humedad gravimétrica de las distintas muestras recogidas (gr). Profundidad (cm)	63
Tabla 16. Valores de humedad volumétrica de las distintas muestras recogidas (mm). Profundidad (cm)	63
Tabla 17. Fechas de los estados fenológicos del cultivo.....	64

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Evolución de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) y precipitaciones (mm) en la zona de Artajona durante el periodo de cultivo (Eje horizontal: semanas; Eje vertical: mm y $^{\circ}\text{C}$).....	17
Gráfica 2. Comparación de los valores de humedad (mm) obtenidos de forma experimental con los valores aportados por las sondas (Identificarlos).....	33
Gráfica 3. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Univ Sur.....	35
Gráfica 4. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Univ Norte.....	36
Gráfica 5. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Coop Norte.....	36

Gráfica 6. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Coop Sur.....	37
Gráfica 7. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Univ Sur a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.....	39
Gráfica 8. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Univ Norte a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.....	40
Gráfica 9. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Coop Norte a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.....	40
Gráfica 10. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Coop Sur a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.....	41
Gráfica 11. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Sur acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad).....	41
Gráfica 12. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Norte acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad).....	42
Gráfica 13. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Norte acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad).....	42
Gráfica 14. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Sur acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad).....	43
Gráfica 15. Acumulación de calor por parte de la planta (°Cd). Eje izq.: acumulación total; Eje dcha.: acumulación diaria.....	47
Gráfica 16. Evolución del valor Kc durante el periodo de desarrollo del cultivo	49
Gráfica 17. Comparación de la ETc y las dosis de agua aportadas en riegos (mm).....	50
Gráfica 18. Comparación de las dosis de riego aportadas por la Cooperativa, por la Universidad y las recomendaciones del SAR de INTIA (mm)	51
Gráfica 19. Evolución del consumo de agua (m ³) de los tratamientos T.Coop y T.Univ por hectárea	52
Gráfica 20. Diferencias productivas de las muestras recogidas entre los tratamientos (kg)	57

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Emplazamiento de la parcela en relación a la ubicación del núcleo urbano (Fuente: SITNA)	12
Imagen 2. Parcela de estudio (Fuente: SIGPAC Navarra)	12
Imagen 3. Extensión correspondiente al sector II.2	13
Imagen 4. Distribución de los distintos tratamientos en la parcela de estudio	15

Imagen 5. Diagrama de texturas de las distintas secciones, dónde los puntos 1 y 2 se corresponden con los horizontes de 0-30 y de 30-60 centímetros respectivamente y el 3 con el horizonte de 60-90 centímetros.....	18
Imagen 6. Modelo de sonda instalada EasyAG.....	21
Imagen 7. Modelo Drill&Drop (Fuente: efesaro).....	21
Imagen 8. Datalogger.....	22
Imagen 9. Balance de agua en la zona radicular (Allen et al., 1998).....	24
Imagen 10. Diagrama para la toma de decisiones diarias del riego.....	26
Imagen 11. Curva generalizada del coeficiente del cultivo (Fuente: FAO 56).....	28
Imagen 12. Distribución del agua aplicada por el aspersor.....	32
Imagen 13. Comparación de una curva de datos calibradas y otra sin calibrar (Calibration Manual for Sentek Soil Moisture Sensors, 2011).....	38
Imagen 14. Comparación de plantas de la zona encharcada y de la zona sin encharcar.....	45
Imagen 15. Suelo saturado en la zona radicular de la zona sur del tratamiento T.Univ.....	45
Imagen 16. Diferencias de desarrollo en las distintas partes de la parcela, en la imagen de la izquierda T.Coop y en la derecha T.Univ.	46
Imagen 17. Capa negra del maíz.....	48
Imagen 18. Mazorca afectada por podredumbre y taladro.....	48
Imagen 19. Grietas superficiales.....	54
Imagen 20. Eliminación de grietas superficiales.....	54
Imagen 21. Agrietamientos subsuperficiales.....	55
Imagen 22. Estado de la parcela en el momento de la cosecha.....	56
Imagen 23. Toma de muestras de densidad.....	60
Imagen 24. Materiales utilizados para la toma de muestras de humedad.....	62

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de agua para la agricultura representa aproximadamente el 70% del total del mundo. Además, en España, los ciclos de sequía son cada vez más acusados, y la competencia con otros usos hace que la cantidad de agua disponible para las explotaciones agrícolas sea cada vez sea más limitada. Esto es debido al aumento del consumo que se está produciendo en los núcleos urbanos, lo que hace del agua un recurso cada vez más valioso. En el futuro, la escasez de este producto podría ser uno de los impedimentos para la producción de alimentos. Por ello a nivel mundial se impone el uso de tecnologías que permitan realizar una gestión de los recursos hídricos adecuada, de forma que dichos recursos no sean malgastados en instalaciones de riego ineficaces.

Por ello, se hace patente la necesidad de incluir en las explotaciones agrícolas herramientas que permitan llevar a cabo un uso más eficiente del agua, lo que podría repercutir en reducciones en estos consumos, suponiendo así un gran beneficio medioambiental. Además, hay que tener en cuenta que este posible ahorro de agua repercute directamente en un ahorro económico para la explotación, lo que consecuentemente deriva en una reducción de los costes de gestión y por lo tanto en una mejora de los márgenes asociados al cultivo.

Actualmente, el uso de herramientas en ámbito agrícola que permiten conocer el estado del cultivo y del medio se ha vuelto relativamente común, ya sea mediante el uso de imágenes aéreas que permiten evaluar el nivel de actividad del cultivo, o mediante el uso de estaciones meteorológicas para la toma de datos, como temperatura y pluviometría. Estas metodologías permiten conocer espacial y temporalmente de manera precisa lo que ocurre en las parcelas y gestionarlas en consecuencia de la mejor manera posible.

Uno de los tipos de sensores que se utilizan en la actualidad son las sondas de capacitancia, o FDR. Estas sondas son capaces de medir la constante dieléctrica del suelo y con ello determinar los niveles de humedad volumétrica presentes en cada instante. Si a esta tecnología se le incluye un sistema de transferencia de datos que permita realizar el monitoreo a distancia, esto permitiría llevar a cabo un seguimiento de los niveles de humedad de forma telemática y, por lo tanto, poder gestionar el riego de una parcela sin necesidad de desplazarse hasta la ésta.

Se ha demostrado en una gran cantidad de estudios que las sondas de capacitancia son eficaces en lo que al control de humedad del suelo se refiere (Gasque *et al.*, 2010; Hidalgo *et al.*, 2003), además de demostrar que son una herramienta eficaz en lo que a gestión de riegos y optimización de los recursos hídricos se refiere (Orozco, 2010; Hidalgo *et al.*, 2003).

2. ANTECEDENTES

Ser capaz de determinar la cantidad de agua presente en el suelo es el primer paso para poder gestionar de manera óptima los niveles de humedad y los recursos hídricos del medio.

2.1.1 Método directo

El método tradicional para determinar la humedad presente en el suelo es el método gravimétrico (Martínez *et al.*, 1994). Esta metodología es tan precisa que se utiliza para calibrar el resto de métodos de medida. Este método permite determinar la masa de agua presente en una cantidad determinada de suelo. El inconveniente que tiene este proceso reside en que dicha metodología es destructiva, es decir, para determinar la cantidad de agua presente en el suelo es necesario modificar las características de dicho suelo, hecho que impide volver a repetir la evaluación de la humedad en un mismo punto concreto a lo largo del tiempo. El contenido de humedad en masa presente en el suelo se representa como $\theta_g(\%)$.

El procedimiento consiste en tomar las muestras de suelo de las zonas y profundidades de interés. Una vez se han recogido las muestras, éstas se pesan húmedas y se introducen en la estufa a 105 °C hasta que el peso permanece constante (entre 24 y 48 horas). Se determina la diferencia de peso y ésta se compara con la masa de suelo seco representando así el contenido de humedad en el momento de muestreo (Grossman *et al.*, 2002). El cálculo tiene la siguiente expresión:

$$\theta_g (\%) = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de suelo seco}} \cdot 100$$

Los resultados obtenidos expresan el contenido de humedad por unidad de masa de suelo. Estos valores relacionados con el valor de densidad del suelo permite obtener la humedad volumétrica del suelo (θ_v).

$$\theta_v = \theta_g \cdot d_a$$

2.1.2 Método Indirecto

Como método alternativo a la manera tradicional se plantean las metodologías indirectas. Con ellas se obtienen una serie de lecturas que, mediante diversas conversiones, permiten conocer los niveles de humedad volumétrica del suelo. La ventaja que presentan estos métodos es que no requieren realizar ninguna operación destructiva para determinar dichos niveles de humedad, además de ser más rápidos.

Por otro lado presentan ciertos inconvenientes, como son los errores que ocasionan las diversas conversiones que se realizan para determinar el valor de humedad. Otro de los inconvenientes que se presentan es el precio de adquisición que tienen estos elementos, así como la necesidad de calibración

para la zona concreta de estudio y la necesidad de una instalación adecuada en la parcela, ya que este último inconveniente es el que mayor número de veces ocasiona fallos de lectura (LabFerrer,2016)

Una de las tecnologías de medida de la humedad del suelo es el uso de sondas FDR. Este tipo de sondas se encargan de medir la frecuencia de la conductividad eléctrica del suelo que hay entre dos anillos de latón, ya que unas ligeras variaciones en el contenido de humedad volumétrica del suelo tienen un gran impacto en las variaciones de la conductividad eléctrica de éste, que repercuten en diferencias en la frecuencia de los campos capacitivos generados (Gabriel *et al.*, 2010). A este tipo de sondas habitualmente se les conecta un *datalogger* lo que permite obtener un registro continuo de los niveles de humedad del suelo en el perfil del suelo que cubre la sonda. El principal inconveniente que tiene este tipo de sondas es la necesidad de estar en contacto íntimo con el suelo que la rodea.

2.1.3 Factores del suelo que condicionan el funcionamiento de las sondas

Hay diversos factores que pueden condicionar las lecturas de las sondas que se instalan en las parcelas, ya que son importantes a la hora de determinar la ubicación de las sondas, así como las calibraciones que vayan a realizársele, en caso de ser necesarias.

- La textura del suelo influye directamente en el valor de las lecturas de las sondas, ya que las ecuaciones de calibración utilizadas en dichas sondas son específicas para cada tipo textural. Además, la textura determina la capacidad de almacenamiento de agua en el terreno.
- La densidad aparente del suelo es un indicador que permite dar una idea aproximada de la cantidad y del tipo de poros presentes en el suelo. Además el tipo de poros presentes en el terreno condiciona la movilidad del agua dentro de éste. Estos valores de densidad están íntimamente relacionados con los valores de las componentes texturales del suelo.
- La presencia de elementos gruesos es un gran inconveniente para el normal funcionamiento de estas sondas, ya que una gran presencia de éstos en la parcela puede conllevar errores en las lecturas de los sensores.

2.2 EL RIEGO POR ASPERSIÓN

El riego por aspersión sigue siendo en España uno de los sistemas de riego a presión más importantes. Esta metodología de riego tiene gran popularidad debido a que no requiere operar ni mantener equipos hidráulicos complejos, además de cubrir una superficie de riego mayor con un costo menor que con los sistemas de riego localizado.

Estos sistemas de riego suelen darse en parcelas destinadas a cultivos extensivos, dónde la totalidad, o prácticamente la totalidad de la superficie de la parcela está cubierta por dicho cultivo. Cuando este no es el caso y el cultivo se encuentra en ubicaciones más localizadas resulta más conveniente la

instalación de sistemas de riego por goteo, que además presentan niveles de eficiencia mayores a los anteriormente mencionados (MAPAMA).

En cuanto a las tipologías de riego, son muy diversas las formas de clasificar tanto los aspersores como dichos sistemas. Se pueden dividir en dos grandes grupos en función de si se puede desplazar el aspersor por la superficie de la parcela o si éste se encuentra inmóvil en una zona determinada.

A continuación se muestran las principales ventajas e inconvenientes que presentan los distintos sistemas de riego por aspersión:

Ventajas:

- Se adapta a las distintas dosis de riego necesarias
- No necesita nivelación lo que facilita por lo general la instalación
- Fácil de automatizar
- Suele permitir el tratamiento con fertilizantes, fitosanitarios y lucha anti-helada con el propio sistema de riego

Inconvenientes:

- Pueden lavarse algunos tratamientos si no se cuida su programación
- Se puede producir una mala uniformidad en el riego si la parcela está bajo la acción de fuertes vientos
- Inicialmente tiene un coste de inversión relativamente alto y de funcionamiento si no está bien diseñado debido al consumo energético que requeriría

2.3 CULTIVO DE MAÍZ

El maíz (*Zea mays*) es originario de Centroamérica, especialmente en la zona de Méjico, y tras la llegada de Cristobal Colón, éste se distribuyó por el resto del mundo. El antecesor de este cultivo se cree que es el teosinte (*Euchlaena mexicana Schrod*) ya que es una especie vegetal con la que tiene en común 10 cromosomas y con la que es homóloga (FAO, 1993).

Éste es un cultivo C_4 , lo que lo hace potencialmente más eficiente en el uso de CO_2 , radiación solar, agua y nitrógeno en la fotosíntesis que los cultivos C_3 desarrollados en las mismas zonas. Pero, en cambio, el maíz también se considera más susceptible al estrés hídrico que otros cultivos. Esto es debido a la estructura floral que presenta (órganos masculinos y femeninos separados) y el desarrollo casi síncrono de los flósculos en un único tallo (GRDC Grow Notes: Maize, 2014).

El maíz es uno de los principales cultivos a nivel mundial con una producción total de 820 millones de t/año en 2008 (FAO). Según las últimas estadísticas de la FAO, su mayor productor es EE.UU., seguido de cerca por China. Otros países que destacan por su producción son Brasil, Méjico, Argentina, India e Indonesia. España ocupa el puesto 27 en el ranking de países productores a nivel mundial pero es el noveno en el ámbito de Europa.

En cuanto a España, las principales Comunidades Autónomas productoras de maíz son Castilla y León, con más de un 25% de la producción total, y Extremadura y Aragón con entre un 15 y un 25%. Otras Comunidades Autónomas con producciones destacables son, por orden de cantidad, Castilla la Mancha (10-15%), Andalucía y Cataluña (5-10%). Por último debemos mencionar a Galicia, Navarra y Madrid, con menos de un 5% de producción cada una.

En España se cultivan híbridos con ciclos que oscilan entre FAO 200 y FAO 800. En las zonas húmedas de Galicia y el Norte de España los ciclos más usados oscilan del 200 al 500. En el sur de Galicia maduran bien los ciclos 600 e incluso los 700. En Castilla y León se cultivan híbridos entre los ciclos 400 y 700, lo mismo que en Cataluña. En Castilla- La Mancha los ciclos más usuales son el 600 y el 700. En cambio, en Navarra desde el ciclo de 300 en la zona norte hasta el de 700 en el sur de la comunidad. En Aragón, Extremadura y Andalucía los ciclos más usuales van del 600 al 800 (MAPA, 2016).

3. OBJETIVOS

En el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (La Coruña), durante la campaña agrícola del 2008, ya se realizó un estudio con el maíz dónde se demostró que las sondas resultan una herramienta de gran utilidad para estimar el consumo hídrico que tiene el cultivo (Valero *et al.*, 2009). Por ello se pretende evaluar si su aplicación sigue siendo de igual utilidad en la zona Media de Navarra, en particular en la localidad de Artajona debido a la ausencia de estudios similares en la zona y con todo el beneficio ambiental, económico e hídrico que ello puede suponer.

Para ello se planteó un ensayo cuya finalidad fue evaluar la utilidad de estos sensores de humedad, viendo así si una gestión del riego en maíz asociada a la información que aportaban dichas sondas tenía efectos en la productividad final de la parcela en comparación a la gestión del riego tradicional que se lleva a cabo normalmente en la zona de estudio. Para ello se determinaron los siguientes objetivos:

- Realizar un seguimiento de los niveles de humedad en el suelo
- Realizar un seguimiento del desarrollo del cultivo
- Evaluar si existen diferencias entre los distintos tratamientos analizados

- Realizar una valoración de si las sondas resultan de utilidad en la gestión del riego del cultivo

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

La zona de estudio de este trabajo se sitúa en la comarca V de Navarra, concretamente en el municipio de Artajona, a una distancia de 25 kilómetros al sur de Pamplona. La parcela en la que se llevó a cabo la experimentación se encuentra a una distancia de 2,5 km al suroeste de la localidad anteriormente mencionada y ésta es propiedad de la cooperativa de Artajona.



Imagen 1. Emplazamiento de la parcela en relación a la ubicación del núcleo urbano (Fuente: SITNA)

Las parcelas de interés, como se ha dicho anteriormente, se encuentran ubicadas en la localidad de Artajona, polígono 12, parcelas 524, 525, 527 y 528, conformando una superficie de 10,16 hectáreas (ha) que están catalogadas en su totalidad como tierra arable. En concreto, estas parcelas están destinadas a la producción de cultivos herbáceos. Toda la parcela cuenta con una instalación de riego por aspersión, lo que garantiza el suministro de agua a la planta incluso en épocas en las que la falta de lluvia puede suponer un problema para los cultivos presentes en las parcelas.



Imagen 2. Parcela de estudio (Fuente: SIGPAC Navarra)

Dichas parcelas son propiedad de la Cooperativa de Artajona, aunque las labores que se realizan las lleva a cabo un agricultor de la zona. En cambio, el riego de la parcela lo lleva una persona que está al cargo de la gestión de los riegos de las parcelas de la cooperativa.

Los hidrantes presentes en la parcela están alimentados por agua proveniente del Canal de Navarra. La zona donde se va a llevar a cabo el estudio, como ya se ha dicho anteriormente, se encuentra en el sector II.2, correspondiente a los términos de Artajona, Larraga y Mendigorriá.

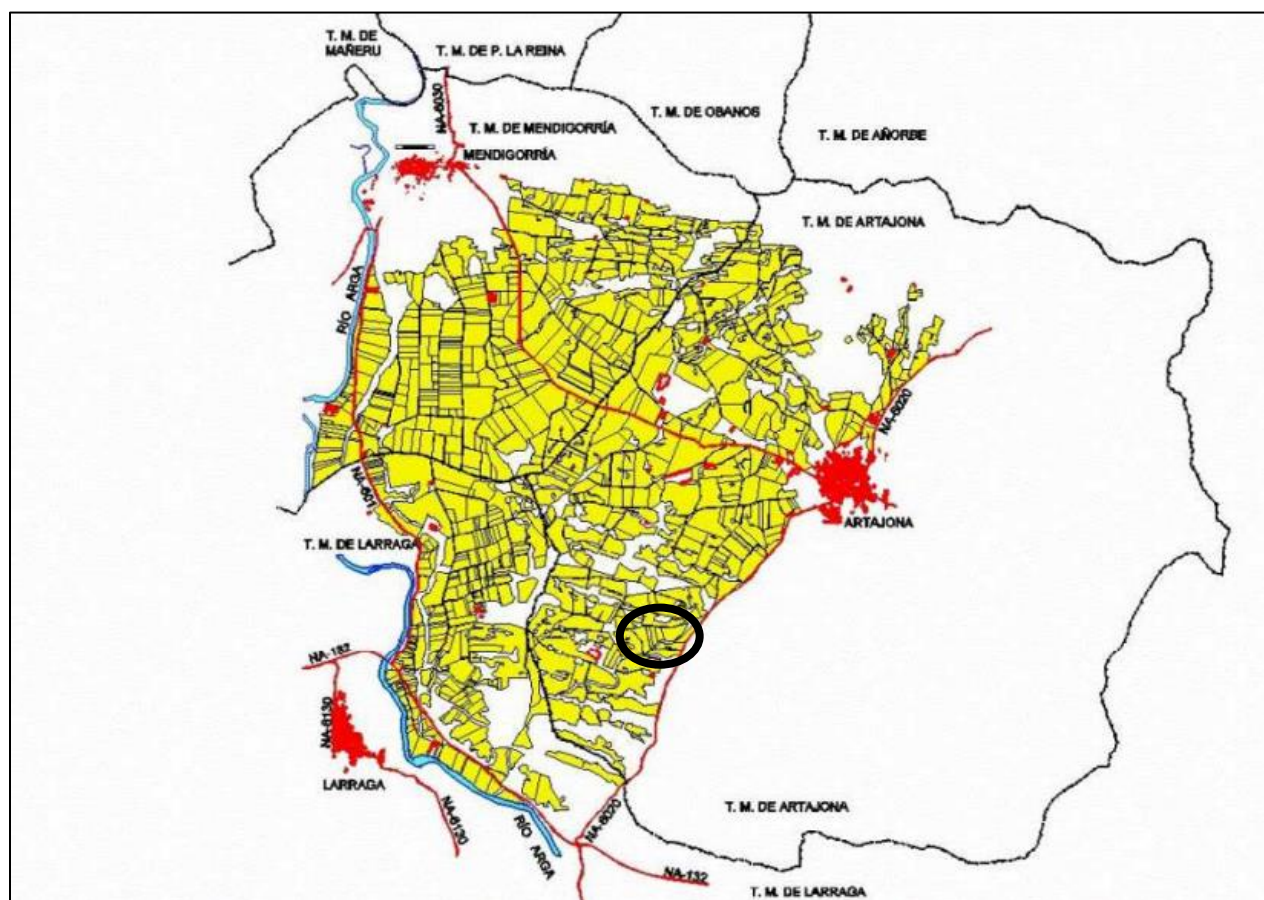


Imagen 3. Extensión correspondiente al sector II.2

4.1.1 Características de los hidrantes

Los hidrantes que alimentan el sistema de riego de la parcela tienen las características que se muestran a continuación:

Tabla 1. Características del hidrante gestionado por la cooperativa (Fuente: Aguacanal)

Nombre del hidrante	H22.161A
Ramal	G.1.15.1
Diámetro del hidrante	3"

Presión del hidrante	4,6 bar
Caudal del hidrante	16 l/s
TP Referencia	H22.159B

Tabla 2. Características del hidrante gestionado por la universidad (Fuente: Aguacanal)

Nombre del hidrante	H22.161B
Ramal	G.1.15
Diámetro del hidrante	3"
Presión del hidrante	4,5 bar
Caudal del hidrante	14,5 l/s
TP Referencia	H22.159B

Ambos hidrantes son controlados mediante un único programador que es capaz de gestionar la totalidad de la parcela. En dicho programador se puede configurar la hora de comienzo, así como los días y el tiempo de duración de cada riego.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El tipo de diseño que siguió este trabajo es del tipo parcelas divididas o *split plot*, dónde hay un único factor y dos repeticiones. Estos diseños son usados cuando alguna de las características de un factor de la experimentación es más difícil de modificar que otras, lo que condicionaría el desarrollo de la experimentación. Son muy útiles ya que permiten realizar varias repeticiones de un tratamiento introduciendo varios niveles de aleatoriedad. Se caracterizan por ser muy comunes en el ámbito de los estudios agrícolas.

En este caso se ha dividido la parcela en dos zonas que se van a caracterizar cada una de ellas por tener una gestión del riego, o tratamiento, distintos. Por ello, para diferenciarlas se denominará a la zona gestionada por la cooperativa *T.Coop*, que se correspondió con la zona este de la parcela y con una superficie de 5,3 ha. A la zona gestionada por la universidad se le denominó *T.Univ*, que fue la zona oeste de dicha parcela y se correspondía con una superficie de 4,8 ha. Además, dentro de la división que se hace se dividieron los tratamientos para obtener dos repeticiones y así poder validar la información obtenida en ambos tratamientos.

Para poder determinar los niveles de humedad en cada una de las repeticiones de los distintos tratamientos se colocaron sondas de capacitancia capaces de determinar la humedad volumétrica del suelo contenido en la zona de influencia de los sensores.

La ventaja que presenta esta parcela es que al tener dos hidrantes, ambas zonas disponen del suyo propio, lo que posibilitó la determinación de la cantidad de agua consumida por los riegos para cada uno de los tratamientos.

Las sondas colocadas en la parte de la T.Univ sirvieron para gestionar el riego en base a los valores de humedad que presentó el suelo en cada momento y las sondas colocadas en el tratamiento T.Coop sirvieron para evaluar el nivel de humedad del suelo y así poder conocer la evolución de la humedad de dicho tratamiento a lo largo de la experimentación.

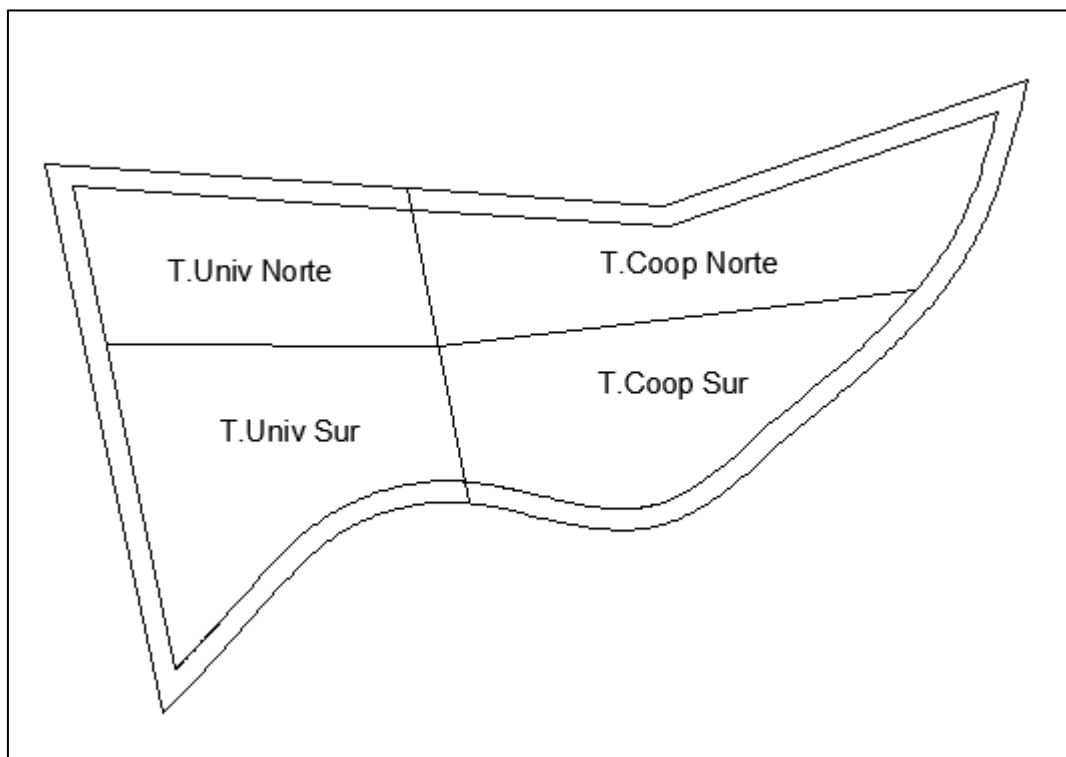


Imagen 4. Distribución de los distintos tratamientos en la parcela de estudio

4.3 MATERIAL VEGETAL

La variedad de maíz sembrada es la Waxy LG 3540, ésta posee un almidón ramificado completamente, constituido 100% por amilopectina, mientras que un almidón clásico está constituido por un 70-75% de amilopectina y un 25-30% de amilosa, lo que le otorga una estructura más dúctil y fluida, a la par que viscosa y estable. Además, esta variedad es capaz de mantener sus propiedades estables incluso después de someterlo a procesos de congelación y descongelación (*Maïsadour Semences*).

Dicha variedad tiene un ciclo FAO 500, lo que quiere decir que requiere 2.001 a 2.075 grados día para alcanzar la madurez fisiológica, lo que hace que su desarrollo tenga una duración aproximada de unos seis meses. Estos grados día son la acumulación de temperaturas medias diarias que se encuentran por encima de 6 °C y por debajo de 30 °C.

4.4 ESTUDIO DE LA ZONA

La zona tiene un clima del tipo mediterráneo templado seco según la clasificación de Papadakis, según el estudio agroclimático de Navarra para la estación de Artajona.

Tabla 3. Descripción climática de Papadakis (Fuente: Estudio climático de Navarra)

Datos de Papadakis	
Número Térmico	8 (Algodón)
Tipo de Invierno	E De avena
Tipo de Verano	8V Algodón (g)
Régimen Hídrico	me Mediterráneo Seco
Grupo Climático	Estepario
Fórmula Climática Breve	E8Vwh9

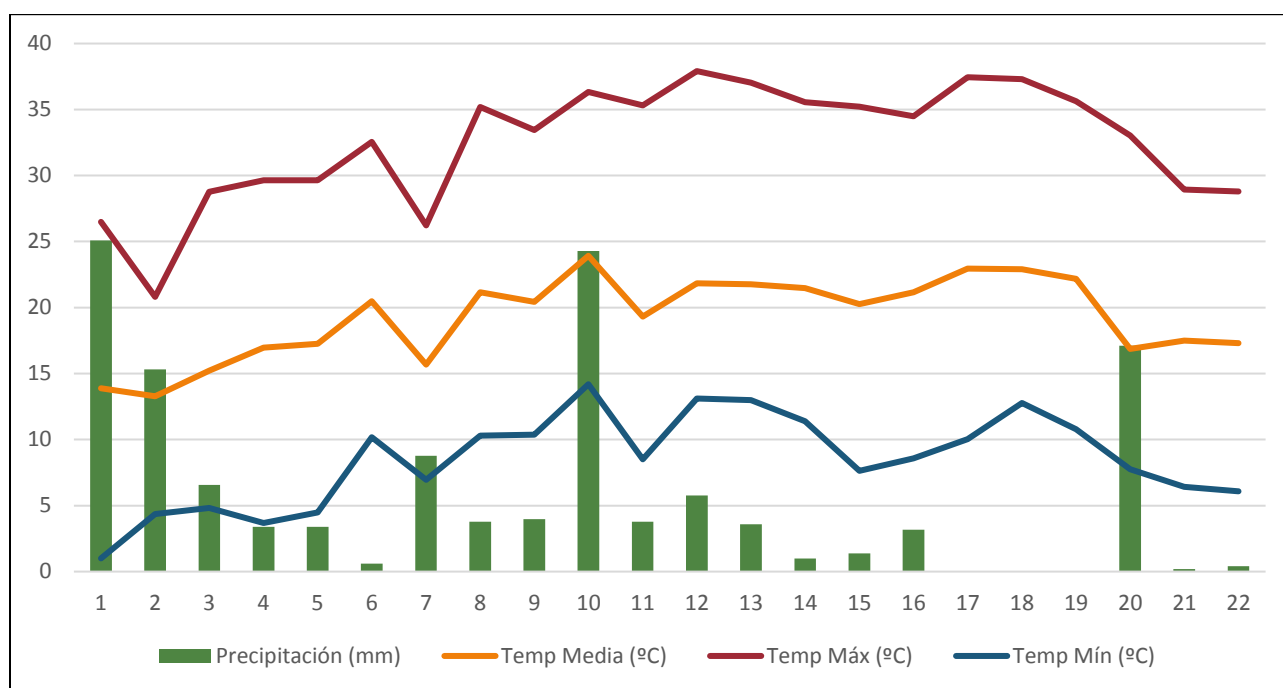
El tener un clima mediterráneo templado seco quiere decir que nos encontramos ante una un clima con veranos secos y cálidos, junto con un régimen hídrico mediterráneo seco. Además tiene un verano del tipo G o de algodón, ello lo clasifica cómo un clima con veranos lo suficientemente cálidos y con una duración de temperaturas adecuadas los suficientemente prolongadas en el tiempo como para cultivar algodón. Al ser un tipo de verano más cálido que el mínimo necesario para poder llevar a cabo el cultivo del maíz, se considera que la zona es apta para el cultivo de dicha especie vegetal.

La pluviometría de la zona fue un factor de cierta importancia, ya que determinó los momentos de riego y labores que se realizaron en la parcela. Climatológicamente hablando, la parcela se encuentra en una zona con veranos secos, lo que implica una pluviometría escasa durante el periodo de tiempo que el cultivo está implantado en la parcela.

4.4.1 Condiciones climáticas durante el periodo de implantación del cultivo

En la propia localidad de Artajona, se encuentra una de las estaciones meteorológicas de la red del MAPAMA (05-Artajona), de la que se tomaron los datos para poder realizar el cálculo de las necesidades

hídricas del cultivo para así posteriormente compararlas con los riegos realizados y valorar de esta forma si se suplieron las necesidades del cultivo y poder determinar el momento del fin del ciclo del cultivo.



Gráfica 1. Evolución de temperaturas (°C) y precipitaciones (mm) en la zona de Artajona durante el periodo de cultivo (Eje horizontal: semanas; Eje vertical: mm y °C)

Como se puede observar, las temperaturas máximas ocurrieron durante la tercera semana de julio y agosto estableciendo unas máximas superiores a 37 °C. Las temperaturas mínimas se dieron durante la primera semana de mayo con una mínima de 1 °C.

En cuanto a las precipitaciones, cayeron 131,44 mm en el total del tiempo que el cultivo estuvo implantado en la parcela. Como se puede observar, más de una tercera parte (50,35 mm) de las precipitaciones tuvieron lugar durante el mes de mayo.

4.4.2 Clase textural del suelo

Para poder establecer un adecuado manejo del riego, lo principal es conocer la relación que existe entre el agua y el tipo de suelo con el que contamos, ya que la textura del suelo va a condicionar la movilidad del agua y la capacidad de almacenamiento en éste.

Por ello lo primero será identificar la textura del suelo que hay en la parcela, con ese fin se ha tomado un análisis de suelos que se había hecho con anterioridad. Éste tenía en cuenta fracciones de suelo cada 30 cm hasta una profundidad de 90 cm.

En el siguiente diagrama (Imagen 5.) de texturas se puede observar que las secciones de 0 a 60 centímetros tienen una textura arcillo limosa. También hay un indicador en la zona correspondiente a la textura franco arenosa, pero esta es la correspondiente a la franja presente entre los 60 y los 90 centímetros de profundidad, por lo que para el caso de estudio resulta irrelevante.

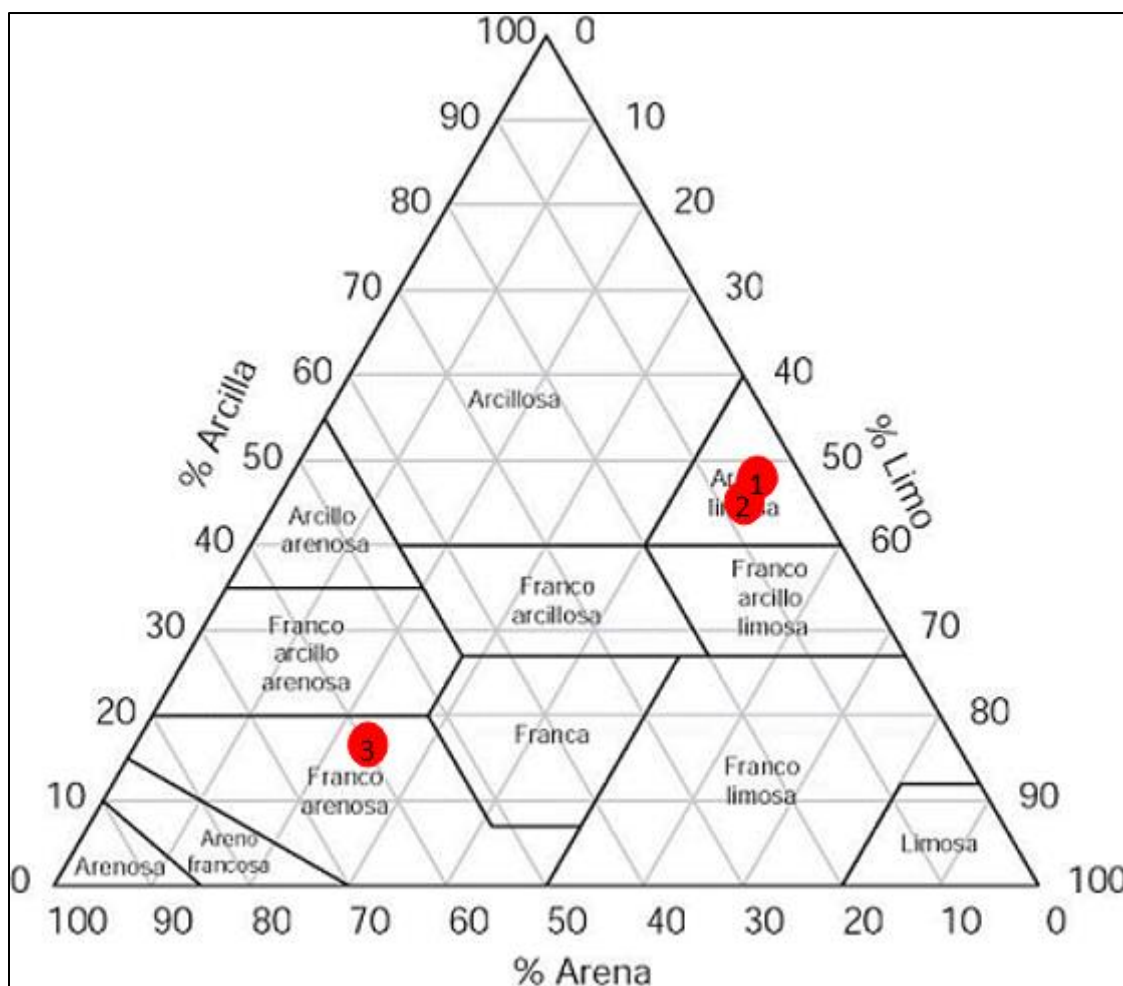


Imagen 5. Diagrama de texturas de las distintas secciones, dónde los puntos 1 y 2 se corresponden con los horizontes de 0-30 y de 30-60 centímetros respectivamente y el 3 con el horizonte de 60-90 centímetros.

Aunque se ha determinado la textura de las tres secciones de suelo, únicamente resultaron de interés para el estudio las dos primeras, ya que la profundidad máxima con la que se va a trabajar son 50 cm.

4.5 LABORES DE CULTIVO

Para que el cultivo estuviera en condiciones óptimas a la hora de llevar el estudio, fue necesario realizar una serie de tareas que garantizaran la sanidad y desarrollo de dicho cultivo.

4.5.1 Manejo del suelo

Para comenzar, se realizó una pasada con un chisel, lo que permitió realizar un laboreo previo del terreno con el fin de romper la costra superficial que se pudo haber formado con anterioridad y de desmenuzar el terreno para comenzar a preparar el lecho de siembra.

Pasados unos pocos días se llevó a cabo una aplicación de purín, lo que enriqueció el terreno en nitrógeno, ya que el purín es rico en este compuesto. Esto permitirá reducir la cantidad de abono a aplicar con posterioridad, además de permitir que una gran cantidad de nitrógeno estuviera para el cultivo en fases tempranas de desarrollo.

Pasadas estas labores, las que se hicieron hasta la fecha de siembra fueron en su mayoría para preparar un lecho de siembra adecuado. Durante este periodo se pasó nuevamente el chisel, el subsolador, la grada de púas junto al rodillo y el rotocultor. De estas labores, el subsolador y el rotocultor tienen gran importancia. El subsolador permitirá descompactar el suelo y eliminar la suela de labor producida por los sucesivos pases de los aperos, lo que tiene gran importancia ya que estamos ante un suelo con cierta tendencia a la compactación. En cuanto al rotocultor, este apero permitirá desmenuzar el suelo en partículas muy pequeñas, lo que garantizará un lecho de siembra adecuado para la semilla.

Una vez se llevaron a cabo estas actividades se consideró que era el momento de llevar a cabo la siembra, para ello se estableció una dosis de 87.885 semillas/ha, con un marco de siembra de 70 por 17 centímetros.

4.5.2 Productos fitosanitarios aplicados

Posterior a la siembra se llevaron a cabo dos aplicaciones de herbicida, una a los pocos días y otra pasados casi dos meses desde la fecha de siembra, con Laudis® y con Emblem®, a unas dosis de 2 litros/ha y de 1,5 kg/ha respectivamente. Esto garantizaría un control de las malas hierbas tanto de las gramíneas como de las dicotiledóneas.

4.5.3 Abonado de la parcela

Pasadas seis semanas desde la fecha de siembra, se volvió a llevar a cabo una aplicación de abono, esta vez de urea 46%, con una dosis aplicada de 550 kg/ha.

4.6 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Para poder conocer en todo momento la humedad presente en el suelo se han utilizado una serie de sondas de capacitancia (o también denominadas de Reflectometría en el Dominio de Frecuencias, FDR) que permiten medir de forma continua el parámetro de la humedad del suelo mediante la medición de la conductividad eléctrica que posee el propio suelo en cada momento.

4.6.1 Funcionamiento de las sondas de capacitancia

Las sondas de capacitancia son elementos que permiten determinar el contenido de humedad del suelo de manera indirecta y no destructiva. Estas sondas estiman la variación de la conductividad eléctrica del suelo en cada momento y la relacionan con la variación de la cantidad de agua presente en los alrededores de la sonda en esos mismos instantes.

Para lograr dicha relación, la sonda hace uso de la ecuación de transformación dónde la sonda trasforma las lecturas de conductividad eléctrica a valores de humedad volumétrica. La ecuación habitualmente utilizada es la siguiente (Gabriel et al., 2010):

$$\theta_v = a SF^b + c$$

Dónde:

a , b y c son parámetros de ajuste que varían en base al tipo de suelo en el que se instala la sonda.

La parte crítica en el uso de estas sondas es la instalación, ya que una mala instalación puede propiciar errores de lectura por parte de la sonda, o pueden producirse eventos durante la instalación que compacten el suelo, modificando así la densidad del suelo y haciendo inservible la calibración realizada para la sonda en el tipo de suelo donde se iba instalar (LabFerrer, 2016).

4.6.2 Sondas instaladas

En la parcela se han instalado dos tipos de sondas, las Drill&Drop y las EasyAG, ambas de la casa comercial Sentek®. Estas sondas permiten tener una lectura de humedad del suelo de forma continua, por lo que permiten conocer el estado de humedad del suelo en todo momento. Aunque las sondas son distintos modelos, ambas son capaces de realizar las mediciones de humedad de igual manera.

Las sondas instaladas en T.Coop son las correspondientes al modelo EasyAG®. Dicho modelo alcanza una profundidad de 50 cm con sensores cada 10 cm, lo que permite analizar el perfil de humedad desde la superficie hasta la profundidad de enraizamiento esperada.



Imagen 6. Modelo de sonda instalada EasyAG

En cambio, las sondas presentes en la parte de T.Univ son las que se corresponden con el modelo Drill&Drop®. Este modelo de sonda tiene una longitud de 60 cm con sensores dispuestos cada 10 cm, al igual que la anterior. El tener un sensor a una profundidad inferior nos da la posibilidad de analizar si está circulando el agua hacia las partes inferiores del suelo, por lo que los riegos podrían no estar siendo todo lo eficientes que se desearía. En caso de necesitarlo, estas sondas cuentan además con sensores de temperatura.



Imagen 7. Modelo Drill&Drop

Las sondas fueron instaladas a pocos centímetros de las hileras para que así el sistema radicular del cultivo las rodeara lo antes posible. Una vez las sondas fueron instaladas, se procedió a configurarlas y a conectarlas a las memorias (datalogger). Estos instrumentos son los que permitirán registrar los datos

tomados por la sonda y desde los que será posible descargarse los datos almacenados vía el *modem* con conexión móvil del que disponen.



Imagen 8. Datalogger

Todas las sondas fueron programadas para registrar los valores de las lecturas de humedad cada media hora y para que mandasen los datos cada cuatro horas a los servidores en los que se almacenaron los datos y desde los que posteriormente se descargaban para trabajarlos en IrriMax®.

4.6.3 Programa de gestión de datos

Para poder obtener los datos y para poder trabajarlos, para así poder conocer el estado de humedad del suelo y así gestionar el riego de manera eficiente. Dicho programa se llama IrriMax® y es propiedad de la misma casa comercial que las sondas (Sentek®).

Este programa convierte los valores de conductividad eléctrica que reciben las sondas, en función de una ecuación de conversión definida, para devolver dichos valores en humedad volumétrica. Además, dicho programa permite establecer una serie de líneas de gestión que permiten visualizar los contenidos de humedad de manera más sencilla.

4.7 RIEGO DEL CULTIVO

La gestión del riego se ha llevado a cabo siguiendo dos pautas. En primer lugar, a partir de la información que aportan las sondas y otra con el propio criterio del agricultor encargado del manejo del riego de la parcela.

4.7.1 Profundidad de trabajo

Aunque la planta de maíz puede alcanzar profundidades de enraizamiento de hasta 1,70 metros de profundidad (Allen *et al.*, 1998), para este caso, hubo que tener en cuenta que la profundidad de trabajo del cultivo iba a ser menor, ya que el cultivo se encontraba en una parcela con capacidad de suplir las necesidades hídricas del cultivo y que además, fue abonada en dos ocasiones, por lo que las necesidades de nutrientes, al igual que las necesidades de agua, estaban cubiertas.

Teniendo estos factores en cuenta, sumado a que el maíz suele tener un sistema radicular superficial, inferior a 60 centímetros (INTIA, 2007), se pretende trabajar con una profundidad de 50 centímetros. Esto es así debido a que la mayor parte de las raíces se van a encontrar a esa profundidad y donde los efectos de la evapotranspiración tienen mayor relevancia.

Con dicha profundidad es con la que se trabajará a la hora de determinar las características de humedad de dicho suelo, como son: la capacidad de campo, el punto de marchitez y el nivel de agotamiento permisible.

4.7.2 Gestión del riego

En T.Coop, la persona designada para llevar a cabo el riego de la parcela se valió de su propia experiencia y de las recomendaciones que realiza el SAR (INTIA). En cambio, en T.Univ se trabajó con la información que aportaban diariamente las sondas, concretamente se determinó la fracción del agua en el suelo denominada nivel de agotamiento permisible (NAP).

4.7.2.1 Establecimiento de las líneas de gestión

Por lo tanto, para poder gestionar el riego de manera adecuada se estableció el rango de gestión en el que debía situarse el nivel de humedad del suelo en todo momento. El límite superior lo marcó la capacidad de campo (CC), dicho valor representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, o sea, la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente (Allen *et al.*, 1998).

El valor superior, como se ha dicho, hace referencia a los valores de CC, éstos se tomaron del documento FAO 56 y se compararon con los valores de humedad reflejados por las sondas para comprobar su veracidad. Para poder obtener estos valores se realizó un riego excedentario para asegurar

que en dicho momento el suelo se encontraba en CC. En cuanto al límite inferior, éste es determinado el punto de marchitez (PM), tomando como referencia los valores indicados en el documento anteriormente nombrado. Este valor indica el nivel de humedad a partir del cual las plantas ya no son capaces de extraerla del suelo.

Por último se indicó el NAP. Éste es el límite que se va a marcar como valor mínimo del rango de humedad en el que debe estar el suelo en todo momento. Este término hace referencia a la cantidad de agua que hay presente en el suelo aprovechable fácilmente por el cultivo.

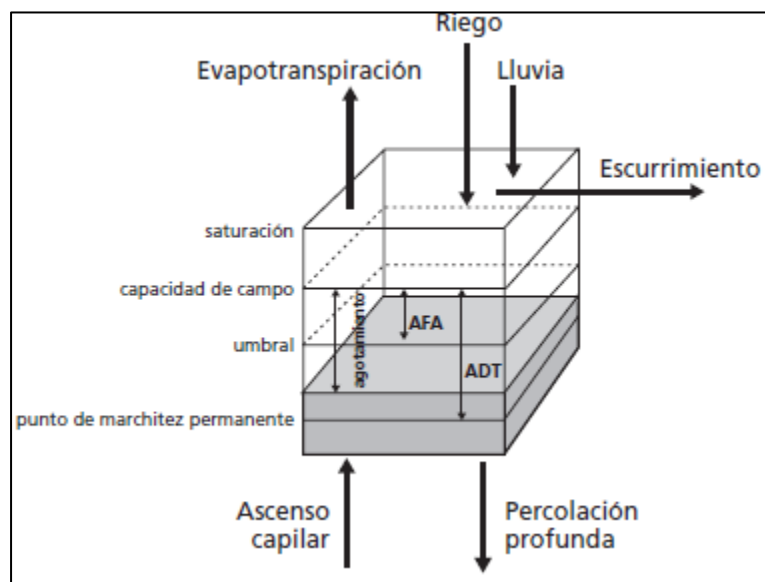


Imagen 9. Balance de agua en la zona radicular (Allen et al., 1998)

El nivel de agotamiento permisible, como ya se ha dicho es la fracción de agua disponible que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico. Habitualmente este valor está considerado entre el 50 y 60% del agua disponible.

Por lo tanto, conociendo los valores de capacidad de campo y de punto de marchitez para el tipo de suelo presente en la parcela de estudio, es posible determinar la cantidad de agua disponible para dicho suelo, y de allí obtener el valor del NAP aplicando un coeficiente del 55% (Necesidades netas, Universidad Politécnica Madrid). Por lo tanto:

$$\text{Agua disponible} = CC - PM$$

$$NAP = \text{Agua disponible} \times 0,55$$

Tabla 4. Características típicas de humedad para el tipo de suelo (Allen et al., 1998)

Profundidad	Textura	CC(m ³ /m ³)	PM (m ³ /m ³)	Agua Disponible (m ³ /m ³)
0 - 60 cm	Arcillo limoso	0,3-0,42	0,17-0,29	0,13-0,19

Por último, para determinar el límite inferior del intervalo de humedad en el que ha de intentar mantener los niveles de humedad del suelo, se restará el valor del NAP al de CC:

$$\text{Límite inferior del intervalo de humedad} = CC - NAP$$

4.7.3 Criterios de riego

Para gestionar el riego, cómo ya se ha mencionado, los datos obtenidos por las sondas de capacitancia se han procesado con el programa de gestión IrriMax®, este programa carga los datos que las sondas registran para después mostrarlos como el usuario desee.

El programa se configuró de tal forma que se establecieron los parámetros de humedad del suelo que se han tomado como referencia para determinar el momento y la cantidad de agua a aplicar. Dichos valores indicarían de forma visual el intervalo de humedad en el que se movería el suelo a lo largo de la experimentación. Para determinar estos momentos de riego, también se tuvieron en cuenta otras variables como:

- La climatología de la zona:
 - Temperaturas
 - Precipitaciones
 - Viento
- Estado fenológico del cultivo
- Reserva de agua en el suelo
- Labores a realizar
- Aporte que puede realizar el sistema de riego

Para ello además se ha tenido en cuenta otras operaciones que se fueran a llevar a cabo, ya que si fuera necesario por algún motivo que la planta tuviera que estar seca, se adaptaría el riego para lograr este objetivo.

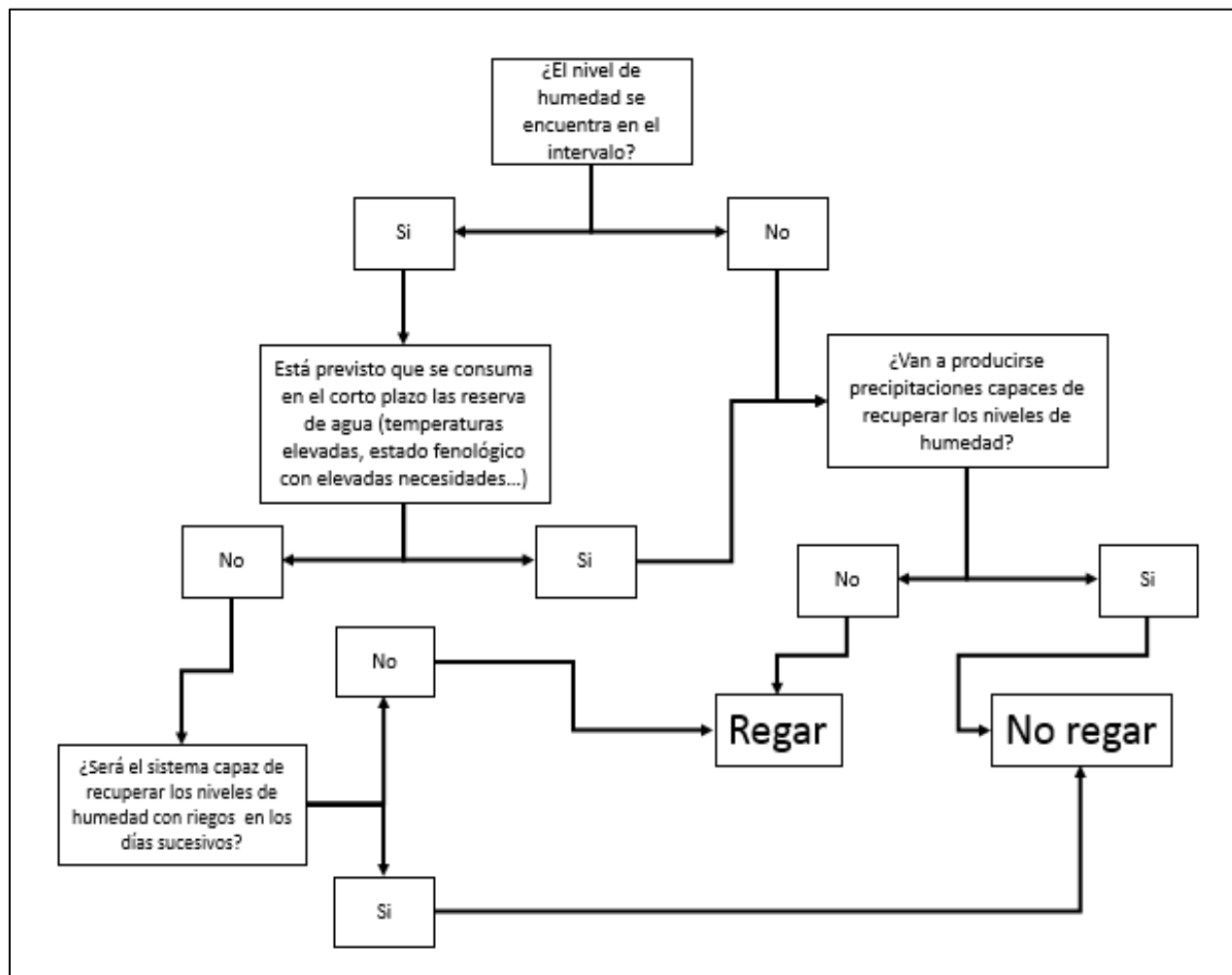


Imagen 10. Diagrama para la toma de decisiones diarias del riego

4.8 VALORES DE COMPARACIÓN

Con el fin de valorar si se ha realizado una buena gestión del riego, se han tomado los datos de los riegos realizados en la zona de estudio y se han comparado con otros valores.

4.8.1 Recomendaciones SAR

Semanalmente, el servicio de asesoramiento al regante realiza una serie de recomendaciones en base a las precipitaciones de la semana y del cálculo de la ETC que realiza el propio INTIA. Por ello se comprobó si los riegos que se realizaron en base a la información que proporcionaban las sondas iban en sintonía a las recomendaciones que realizaban o si diferían de estas.

4.8.2 Riegos de T.Coop

Otro de los valores con el que comparar los riegos aplicados, son las dosis de riego que realiza en T.Coop. Las dosis de riego son determinadas por la persona encargada de gestionar el riego de las parcelas de la cooperativa. La obtención de los valores de las dosis de riego permitió evaluar la metodología de riego que sigue la cooperativa en relación a lo recomendado por INTIA y a la gestión realizada en el T.Univ.

Los valores de referencia que toma el encargado de realizar los riegos en T.Coop son las recomendaciones que realiza el SAR de INTIA junto con el criterio propio, fruto de la experiencia adquirida con el paso de los años.

4.8.3 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Es necesario poder determinar si se han cubierto las necesidades hídricas del cultivo a lo largo de su ciclo de desarrollo, por ello se han calculado las necesidades hídricas de dicho cultivo para el tiempo que ha durado su ciclo.

Para ello se ha optado por utilizar el método FAO de único coeficiente del cultivo, este método permite determinar las necesidades hídricas de un cultivo conociendo la evapotranspiración de referencia de la zona de estudio (ET₀) y el coeficiente de cultivo (K_c) aplicado a cada una de las fases de desarrollo de dicho cultivo. La fórmula utilizada es:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Los valores de ET₀ hacen referencia a las condiciones climáticas de la zona durante el periodo de tiempo que el cultivo ha estado implantado en la parcela y la K_c hace referencia a las variaciones en el desarrollo de la planta, y por lo tanto de sus necesidades, a lo largo de su ciclo.

Para hacer el cálculo de dichas necesidades FAO determina tres periodos principales en los que divide las necesidades del cultivo: fase inicial, mitad de temporada y fase final.

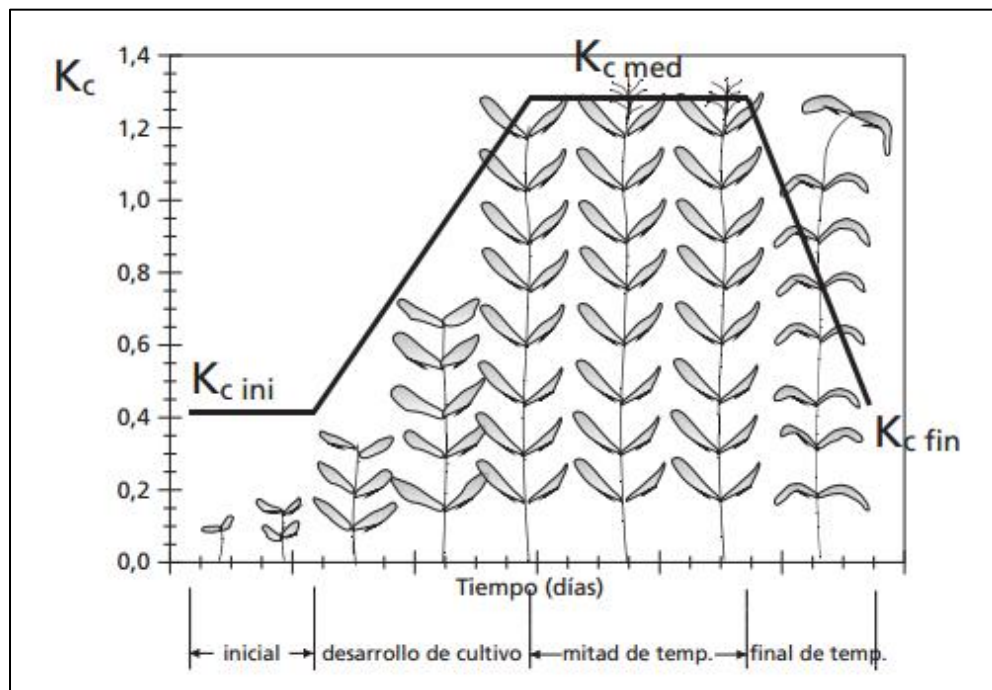


Imagen 11. Curva generalizada del coeficiente del cultivo (Fuente: FAO 56)

Como se puede ver en la imagen anterior, inicialmente las necesidades del cultivo son reducidas, pero conforme el cultivo avanza en su desarrollo dichas necesidades aumentan alcanzando su valor máximo hacia la mitad de la temporada. Estas necesidades permanecen máximas hasta el momento en que el cultivo alcanza su fase final, dónde dichos valores se ven reducidos de manera gradual.

Una vez se obtuvieron las necesidades hídricas del cultivo a lo largo de su ciclo, éstas se compararon con las dosis de riego aplicadas y así poder valorar cómo se habían ajustado los riegos a dichas necesidades.

4.9 RECOLECCIÓN

Para llevar a cabo la cosecha se tomaron 90 mazorcas en cada una de las repeticiones de los tratamientos. Concretamente, en cada muestreo se realizaron 3 repeticiones en las que se tomaron 30 mazorcas, y dichas repeticiones que realizaron en las zonas circundantes, cuatro hileras por encima y por debajo con respecto a la hilera más próxima al punto de instalación de las sondas, obteniendo así un total de 360 mazorcas.

Una vez en la parcela se, recolectaron las mazorcas y éstas se colocaron en sacos de rafia para posteriormente ser trasladados a la cooperativa. Allí se desgranaron las mazorcas y se evaluaron los siguientes parámetros del cultivo con el fin de valorar la productividad de las distintas zonas de la

parcela: número de granos por hilera, rendimiento, el peso de mil granos (PMG), la humedad y el peso específico (PE) de las distintas muestras.

4.9.1 Análisis estadístico

Para poder determinar si los resultados obtenidos presentan diferencias significativas con respecto al testigo, se realizaron una serie de análisis de la varianza. Éste, es un tipo de análisis que se utiliza cuando se quieren comparar dos o más valores medios

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 DETERMINACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

Inicialmente, para poder configurar los límites de las gráficas del programa de gestión, fue necesario determinar una serie de valores relacionados con la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Para determinar la CC se utilizó el concepto teórico de CC y se llevó a cabo a la práctica. Para ello se regó hasta saturación y cuando se estabilizaron los niveles de humedad se tomaron los valores indicados por las sondas para este parámetro. Posteriormente este valor se comparó con los valores indicados en Allen *et al.* (1998) y se vio que se estaba trabajando con los valores más altos del intervalo recomendado para este parámetro.

Tabla 5. Valores de Capacidad de campo para los distintos tramos de profundidad (mm)

Profundidad (cm)	T.Univ Norte	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
10	39	38	30	30
20	41	40	36	42,
30	41	41	40	39,
40	39	42	40	41
50	42	42	42	41

Una vez obtenidos los valores de CC lo siguiente fue determinar los valores de PM. Viendo que la tendencia del suelo para los valores de CC había sido relativamente alta, se adoptaron valores altos en el intervalo del PM determinado para este suelo.

Tabla 6. Valores del Punto de Marchitez para los distintos tramos de profundidad (mm)

Profundidad (cm)	T.Univ Norte	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
10	20	19	18	18
20	21	21	19	22

30	21	21	21	20
40	20	22	21	21
50	21	22	22	21

Una vez se determinan ambos valores, CC y PM, se puede proceder a calcular el agua disponible. Este valor es la cantidad total de agua que va a estar disponible para la planta. Dicho valor resulta de calcular la diferencia de los valores anteriormente determinados (CC y PM):

Tabla 7. Valores del Intervalo de Humedad Disponible para los distintos tramos de profundidad (mm)

Profundidad (cm)	T.Univ Norte	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
10	19	19	12	12
20	20	19	17	20
30	20	20	19	19
40	19	20	19	20
50	21	20	20	20

Con el agua total que va a estar disponible en el suelo se procede a determinar el NAP. Este NAP es la cantidad de agua de la que la planta dispone con mayor facilidad. Como se ha determinado con anterioridad, el NAP va a ser el 55% del agua total disponible (Allen *et al.*,1998), lo que resulta:

Tabla 8. Valores del Nivel de Agotamiento Permisible para los distintos tramos de profundidad (mm)

Profundidad (cm)	T.Univ	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
10	10	10	7	7
20	11	10	9	11
30	11	11	10	10
40	10	11	10	11
50	12	11	11	11

Para determinar el NAP en los 50 cm de suelo que se ha determinado como profundidad de exploración de las raíces, basta con sumar los valores del NAP para cada una de las fracciones de profundidad que se han establecido, todas ellas coincidentes con las profundidades a las que se encuentran los distintos sensores de las sondas. Como resultado final se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 9. Valores de NAP para las distintas zonas de la parcela (mm)

	T.Univ Norte	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
NAP Total	54	54	47	50

Los valores de NAP calculados se restaron a los valores de CC que se establecieron en un principio y de esta manera se obtuvo el contenido de humedad del suelo por el que había que estar en todo momento por encima. Con lo que finalmente, los niveles de humedad que indicaban el intervalo de humedad en el que se pretendía mantener los niveles de humedad fueron:

Tabla 10. Valores indicativos del intervalo de la humedad del suelo. Capacidad de campo - Límite inferior del intervalo de gestión (mm)

	T.Univ Norte	T.Univ Sur	T.Coop Norte	T.Coop Sur
Intervalo de humedad	202 - 148	203 - 149	188 - 140	193 - 143

5.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RIEGO

El agua que se aporta al cultivo viene dada por un sistema de riego por aspersión, lo habitual en este tipo de cultivo en la zona en la que nos encontramos. Dicho sistema de aspersión tienen un marco de 15x18 metros además de tener una precipitación de 6.63 l/m² por hora y una presión de trabajo de 35 metros de columna de agua (m.c.a.).

La distribución del sistema de riego se supone uniforme, aunque se llevaron a cabo una serie de comprobaciones mediante las que se evidenció que esto no era así. Se realizó un muestreo en uno de los aspersores de manera aleatoria y se pudo observar que existían variaciones en la aplicación de agua. Para ello se distribuyeron una serie de latas creando una red que cubría el marco de aspersión y se pesaron cada una de las latas tras los riegos. Así se pudo comprobar la cantidad de agua que caía en cada punto de la zona que cubre el aspersor. Tras realizar tres comprobaciones de la lluvia se llegó al siguiente diagrama:

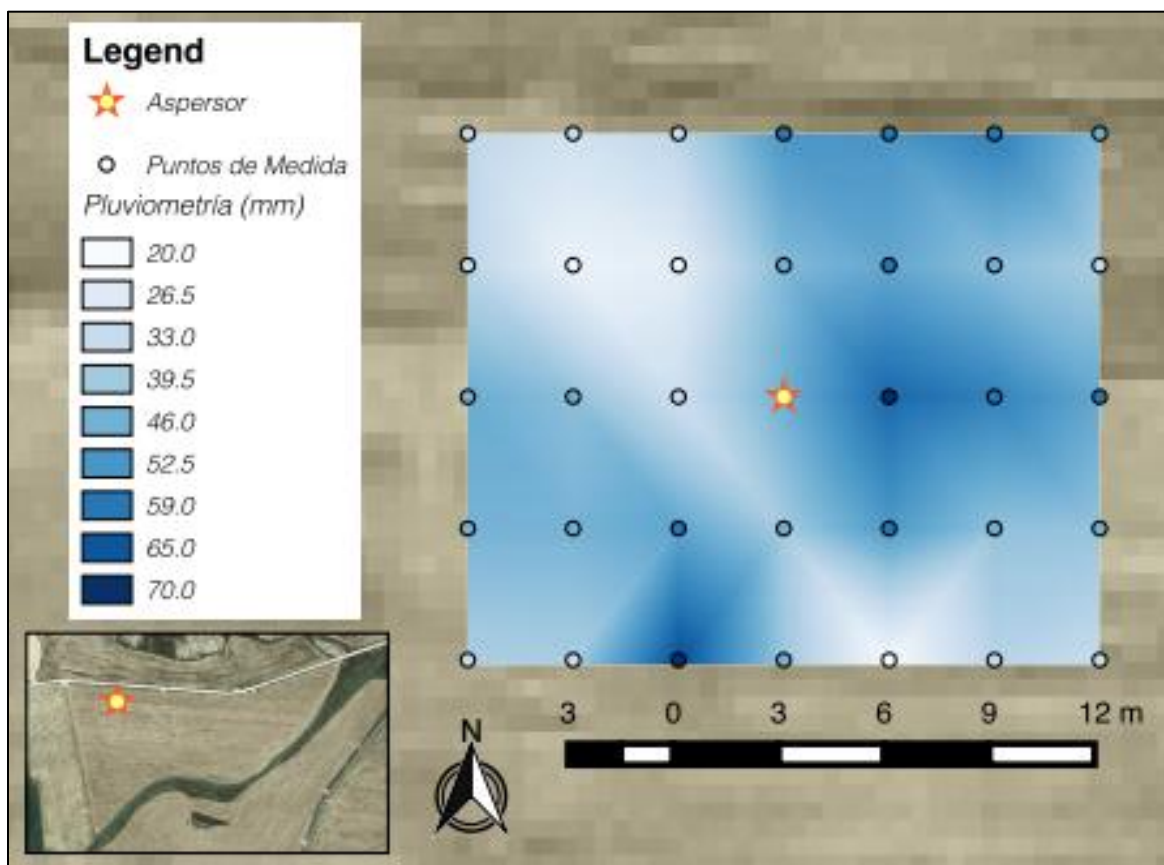


Imagen 12. Distribución del agua aplicada por el aspersor

Cómo se puede apreciar, existen diferencias evidentes en lo que a la distribución del riego se refiere, habiendo un punto en concreto en el que se produce un pico en la cantidad de agua aplicada, además de una zona en la que la cantidad de agua aplicada también es ligeramente inferior al resto del área regada.

Aunque se realizó esta experimentación únicamente en uno de los aspersores, es posible que este caso se de en más, por lo que la gestión del riego puede ser ineficaz en la parcela si, como se ve, la distribución de la lluvia generada por los aspersores no es uniforme.

5.3 CALIBRACIÓN DE LAS SONDAS DE HUMEDAD

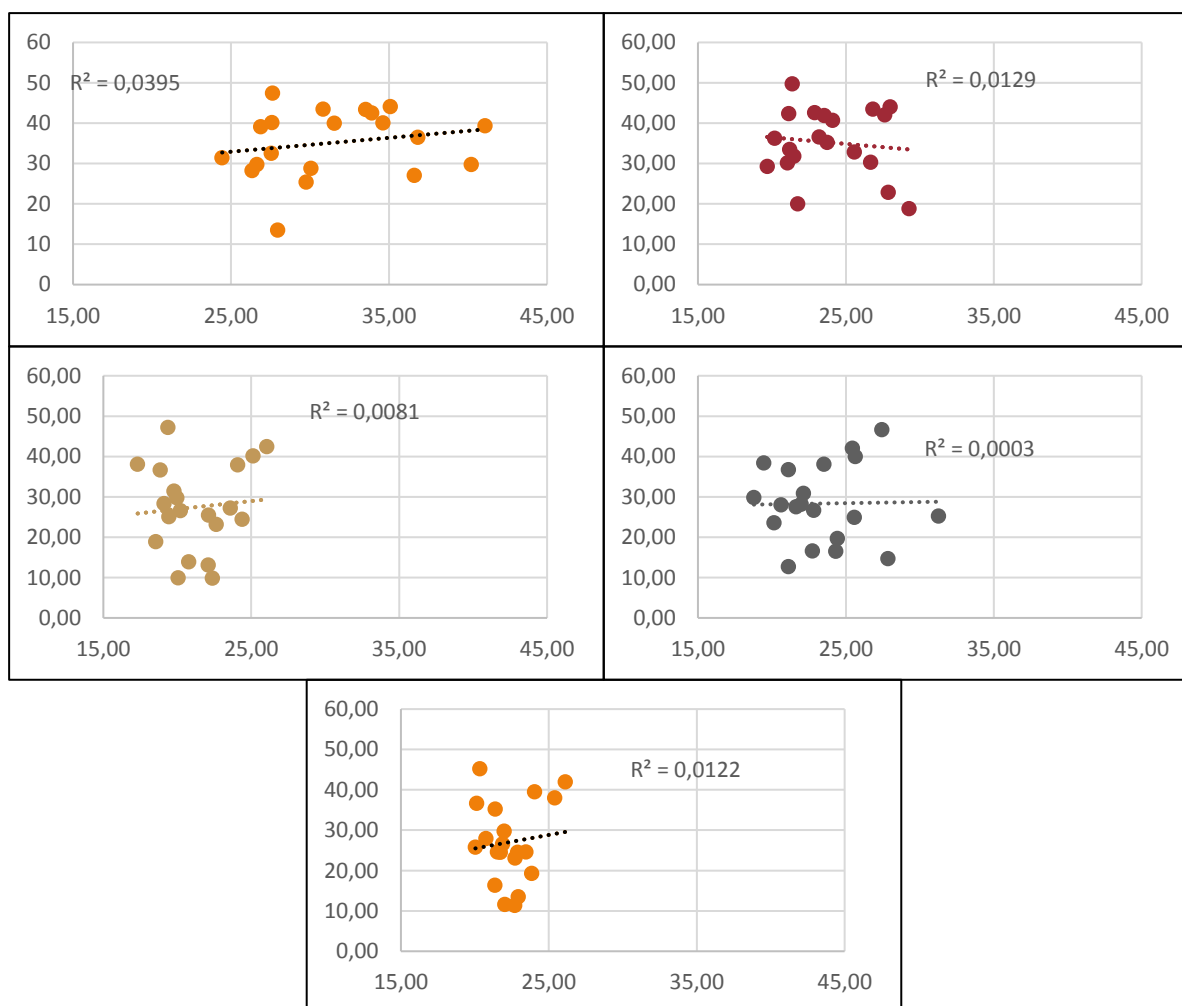
Es importante conocer si los valores que determinan las sondas son valores fiables, ya que dichos valores son los que van a determinar los momentos de riego del cultivo, por ello se han comparado los valores de la humedad real del suelo obtenida de manera experimental con los valores de humedad que otorgan las sondas.

5.3.1 Valores de humedad del suelo

Lo primero que hubo que realizar para poder evaluar si las sondas estaban llevando a cabo una buena determinación de la humedad en el suelo fue determinar la humedad real que había presente en el propio suelo durante ciertos momentos.

Por ello, se fue a campo cinco veces en las que se tomaron repetidas muestras de suelo con el que medir la humedad volumétrica a las mismas profundidades a las que las sondas tenían localizados los sensores. Con ello se obtuvieron un total de cien valores de humedad gravimétrica tras multiplicar los valores de humedad gravimétrica por la densidad aparente correspondiente a cada profundidad.

Con los datos de humedad volumétrica ya obtenidos, se procedió a compararlos con los valores de humedad volumétrica que daban cada una de las sondas para las distintas zonas:



Gráfica 2. Comparación de los valores de humedad (mm) obtenidos de forma experimental con los valores aportados por las sondas (Identificarlos) (De izquierda a derecha y de arriba abajo, repeticiones 1, 2, 3, 4 y 5 de las tomas de muestras de humedad)

Si se comparan los valores dados por las sondas con los datos aportados obtenidos de forma experimental se puede ver que existen ciertas discrepancias. Dichas discrepancias muestran valores de correlación bajos en todos los casos, por lo que se llegó a la conclusión de que las sondas debían de tener una calibración inadecuada.

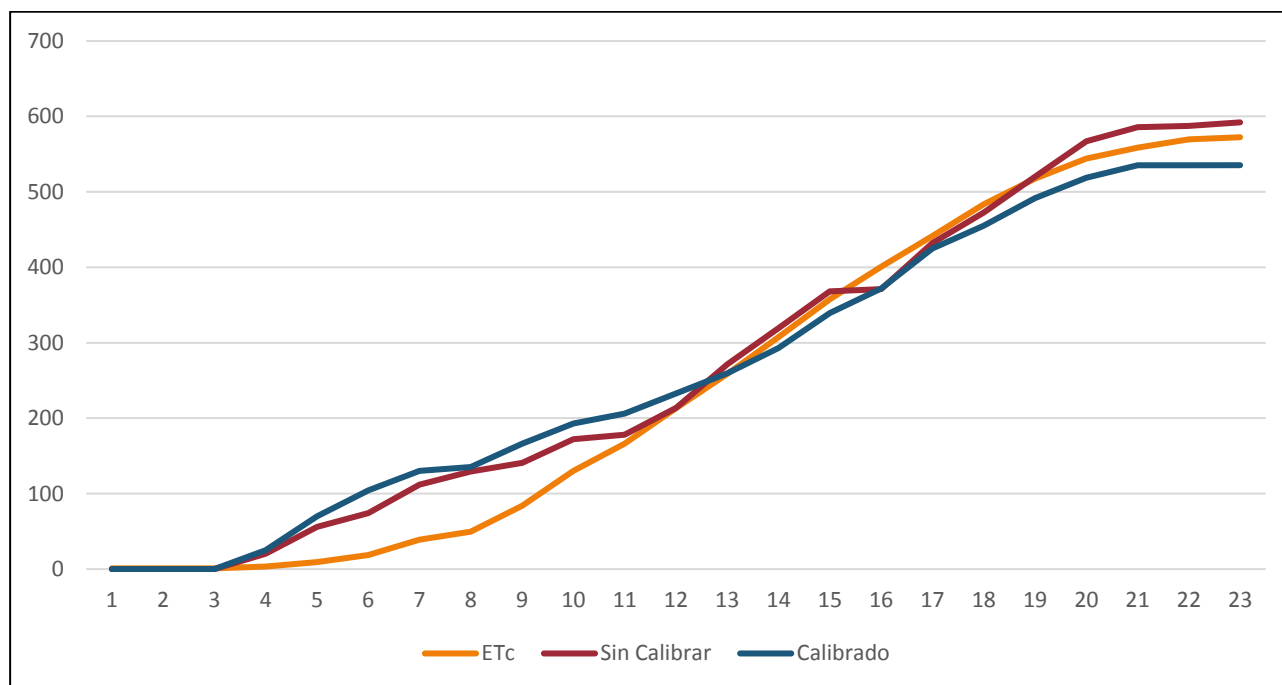
Estas diferencias que se dan entre los valores obtenidos de forma experimental y los valores determinados por las sondas pueden ser debidos a distintas causas (Calibration Manual for Sentek Soil Moisture Sensors, 2011):

- Una incorrecta normalización del sensor
- Errores en el muestreo (p. ej: tomando muestras fuera de la esfera de influencia del sensor)
- Espacios de tiempo muy grandes entre el momento de muestreo y su pesado en el laboratorio
- Errores derivados de la medida de humedad volumétrica (derivados del pesado o de la determinación de la densidad de las distintas zonas y profundidades)
- Diferentes valores de humedad en los alrededores de la sonda
- Uso de densidades aparentes medias o aproximadas en lugar de utilizar las de cada punto en concreto
- Errores derivados del proceso de secado de las muestras (p. ej: tiempos de secado insuficientes en la estufa)
- Toma insuficiente de muestras
- Errores de identificación de las muestras
- Uso de escalas de medida diferentes en varios instrumentos de medida
- Problemas durante la instalación de las sondas (presencia de flujos preferenciales o compactación del suelo)
- Errores en los cálculos matemáticos
- Uso de datos imprecisos
- Muestras de suelo con elevado contenido de raíces

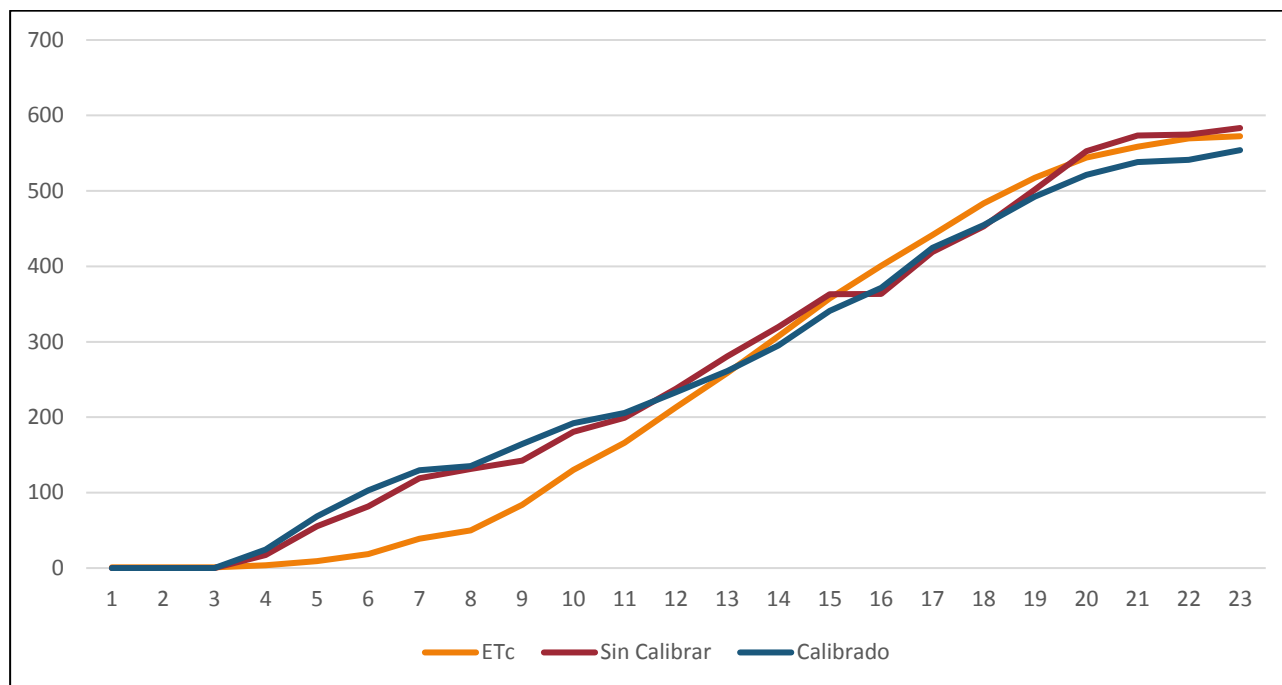
Una vez se vio que las sondas tenían una calibración que no se ajustaba adecuadamente a las características del terreno, se procedió a recalibrarlas. Para ello, ya que las sondas realizan una medición indirecta de la humedad, lo primero de todo fue conocer las lecturas de frecuencia que realiza la sonda, ya que este va a ser el dato real de lectura que realiza el instrumento.

Cuando se obtuvieron las lecturas de frecuencia, se procedió a recalcular los valores de humedad, pero esta vez variando los valores de los parámetros a , b y c para que se ajustaran lo máximo posible a los valores reales de humedad. Para ello se llevó a cabo el cálculo de los errores medios cuadráticos de las sondas en comparación a los valores de humedad determinada de forma experimental y la correlación entre dichos valores.

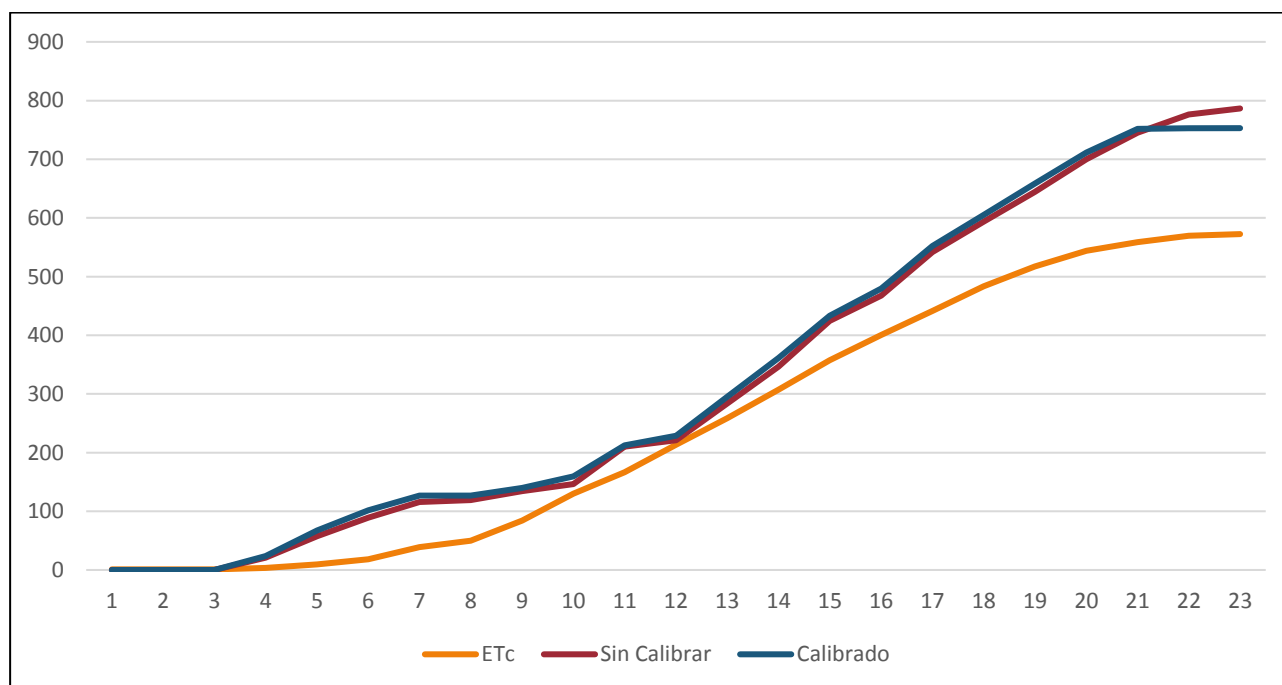
Finalmente, cuando se llevaron a cabo las recalibraciones de las sondas y se introdujeron los parámetros que aportaban un resultado más ajustado a la realidad del cultivo, ya fuesen resultado de minimizar el error medio cuadrático o de maximizar el coeficiente de determinación.



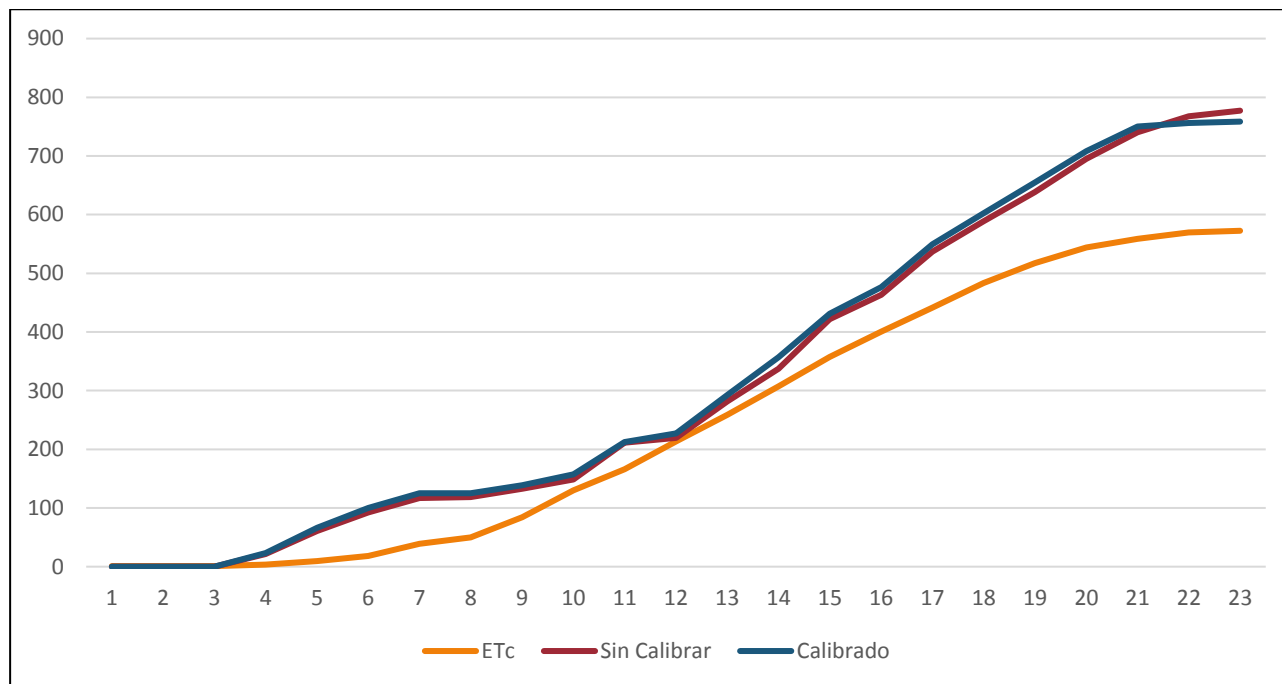
Gráfica 3. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Univ Sur



Gráfica 4. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Univ Norte



Gráfica 5. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Coop Norte



Gráfica 6. Curvas de evolución de las necesidades del cultivo (mm) recalibrando las sondas con los parámetros ajustados en el T.Coop Sur

Como se puede apreciar, aunque los valores no se ajustan a la recta de necesidades acumuladas de la ETC, se puede ver que se asemejan a ésta, por lo que se consiguió que se ajustaran más los valores a la recta del cultivo, pero no se consiguió una calibración óptima.

Por lo tanto, se puede determinar que las sondas no aportan unas buenas lecturas en lo que a valores absolutos se refiere cuando tienen una calibración, pero resultan igualmente de interés ya que las lecturas relativas de humedad que aportan siguen siendo de utilidad para la gestión del riego.

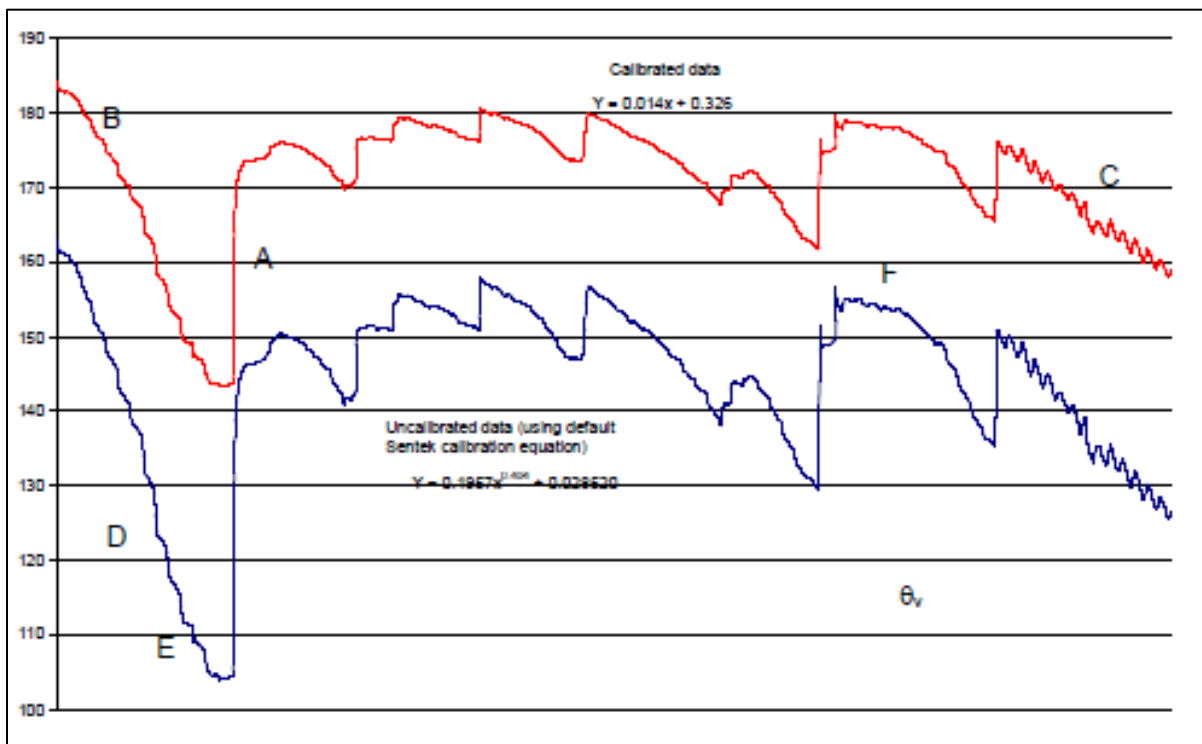


Imagen 13. Comparación de una curva de datos calibradas y otra sin calibrar (Calibration Manual for Sentek Soil Moisture Sensors, 2011)

5.4 GESTIÓN DEL RIEGO

Aunque inicialmente la gestión del riego fue llevada de manera conjunta por parte de la persona encargada de la gestión del riego. A partir del momento en que las sondas comenzaron a reflejar cierta actividad por parte de la planta (hacia el 10 de junio), lo que implicaba un consumo de agua por parte de la planta y por lo tanto presencia de raíces en los alrededores de las sondas, la gestión del riego se llevó a cabo de forma distinta en cada una de las zonas.

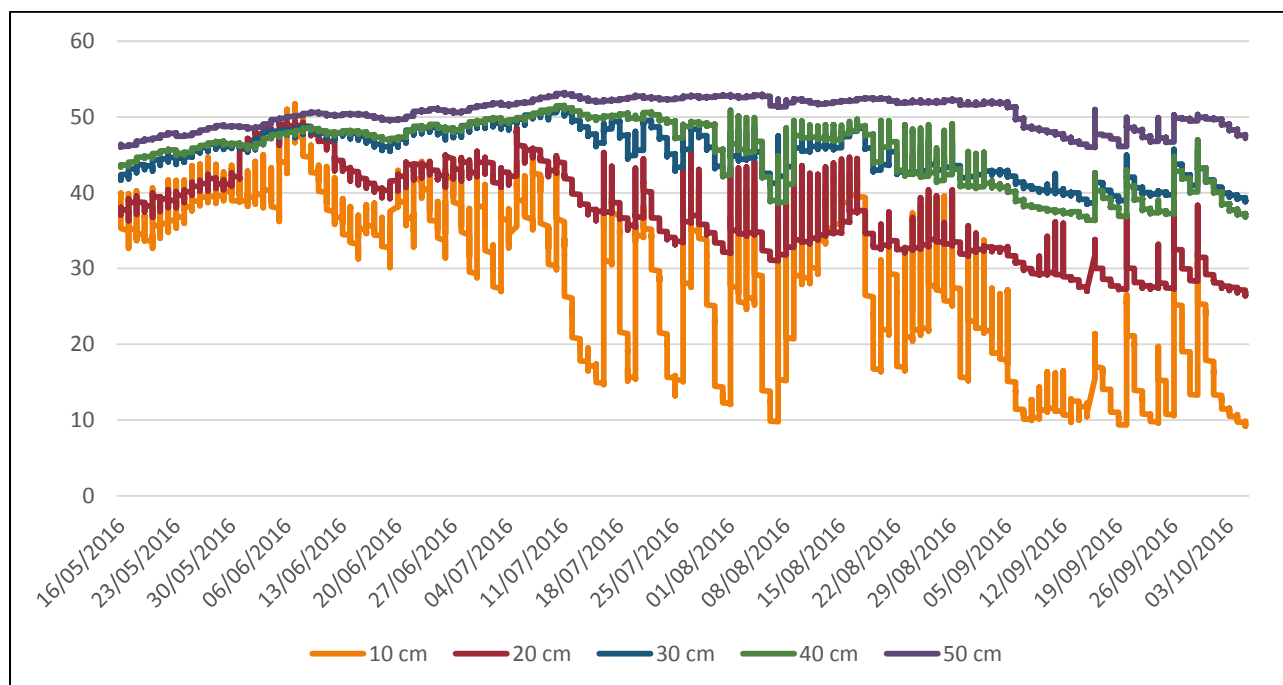
Una vez se establecieron los límites en los que debía permanecer la humedad en el suelo, se comenzaron a gestionar los riegos de tal forma que la humedad de este permaneciera siempre dentro de dichos límites. Dicha gestión del riego venía condicionada también por los criterios de riego que se explicaban anteriormente, como eran la probabilidad de lluvias o la capacidad de aporte del sistema de riego entre otros.

Inicialmente el cultivo se desarrolló sin evidencias de problemas y de manera homogénea. Tras el transcurso de unas pocas semanas, se dio el caso de que en una parte de la zona SO se produjo un encharcamiento a poca profundidad, lo que obligó a gestionar el riego de tal forma que la zona T.Univ

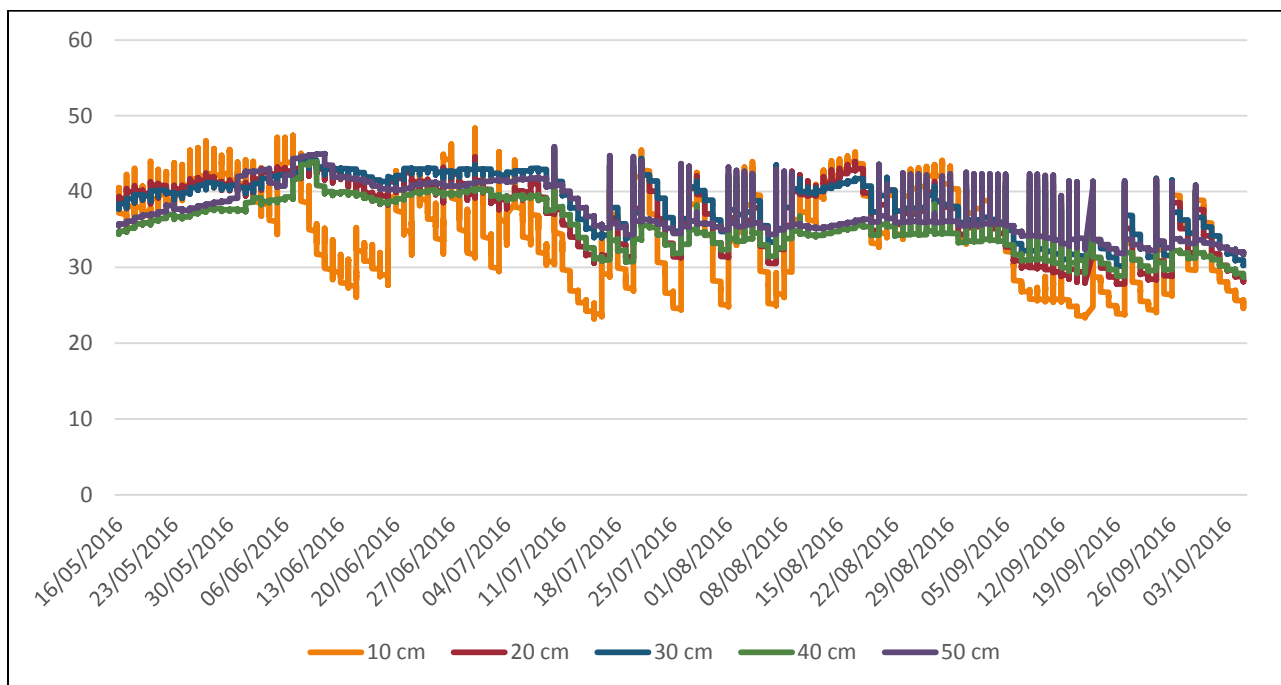
Norte no sufriese estrés hídrico, pero que la zona T.Univ Sur no tuviera los horizontes en saturación. Este problema se solventó una vez la zona T.Univ Sur alcanzó estadios de desarrollo avanzados en los que el consumo de agua era mayor, lo que aproximó las necesidades hídricas de esta zona a las de la zona T.Univ Norte.

Otro momento en el que fue importante la gestión del riego fue el momento de la polinización. Durante los días del 1 al 7 de agosto, momento en el que ocurrió dicho evento, se planteó alterar la programación habitual de riego para mejorar la viabilidad del polen y mejorar la efectividad de la polinización, pero debido a que no se pudo determinar si verdaderamente existía una mejora con respecto a la práctica habitual, se optó por continuar con la metodología habitual.

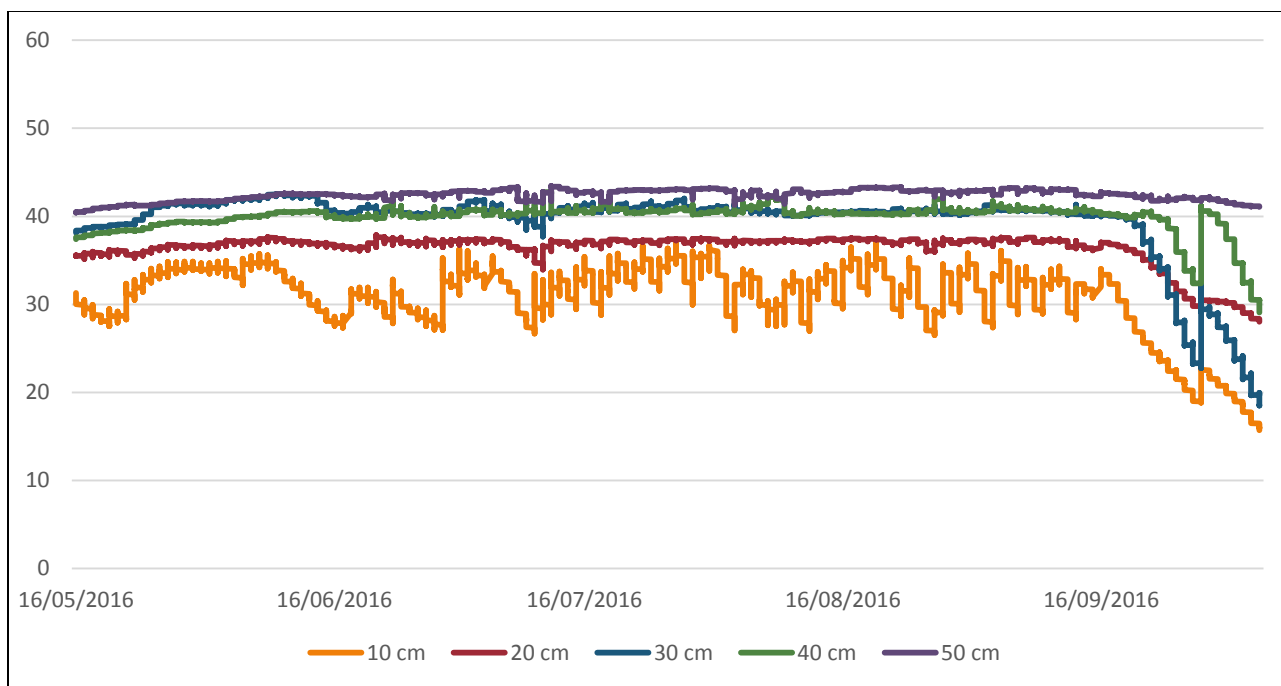
Pasada la fase de la polinización, el cultivo se situaba en la fase de formación del grano y de llenado. Durante estas fases resultó imprescindible que el cultivo no sufriese ningún tipo de estrés hídrico, ya que esto condicionaría la productividad final del cultivo. Por esto, sumado a las condiciones meteorológicas de elevadas temperaturas que se dieron, se produjeron durante un tiempo riegos prácticamente a diario.



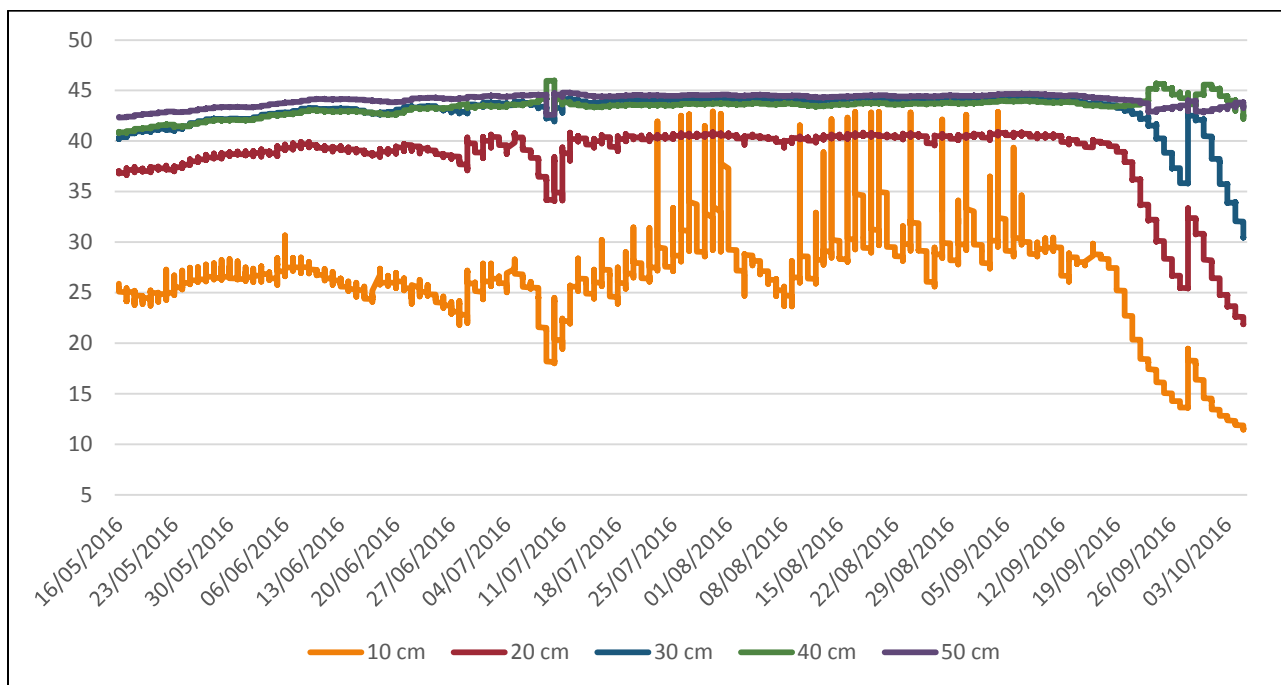
Gráfica 7. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Univ Sur a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.



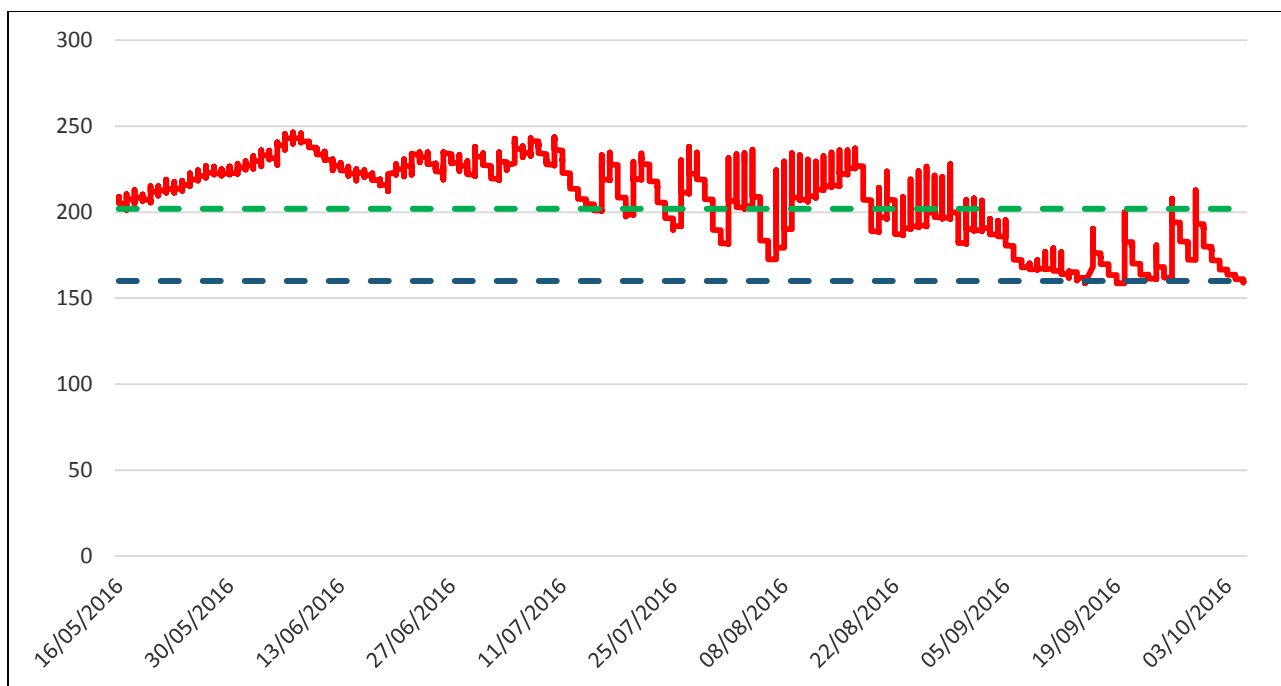
Gráfica 8. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Univ Norte a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.



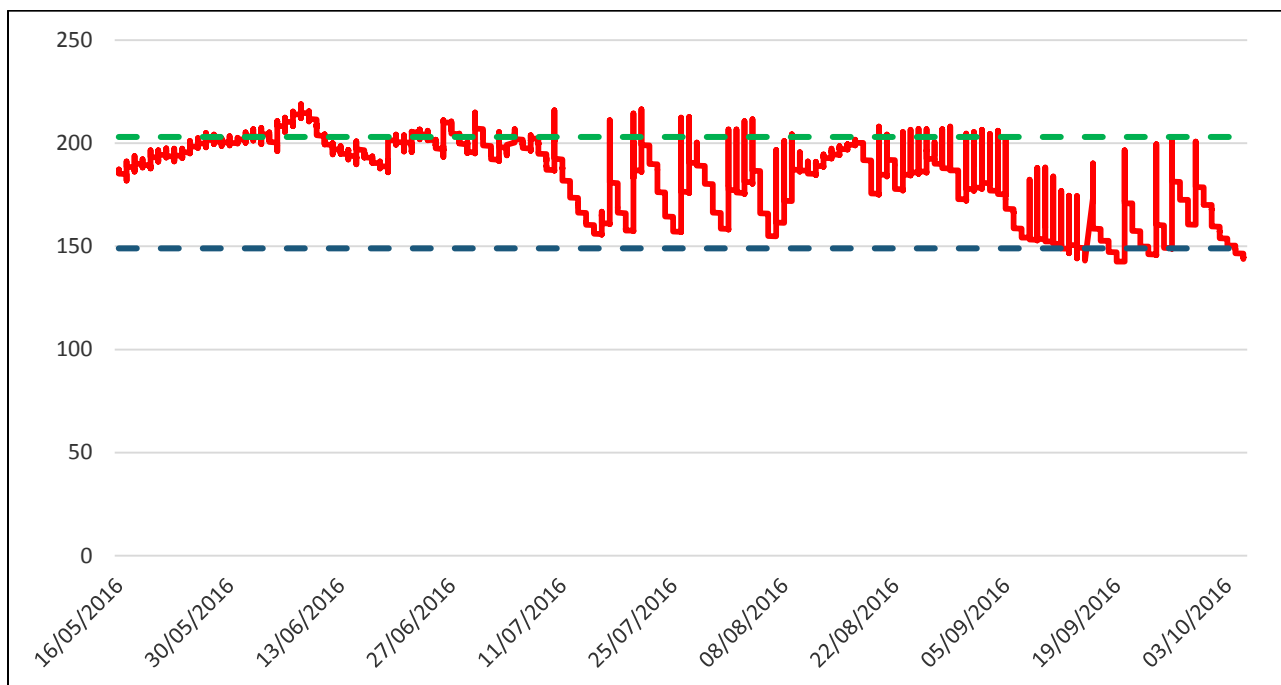
Gráfica 9. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Coop Norte a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.



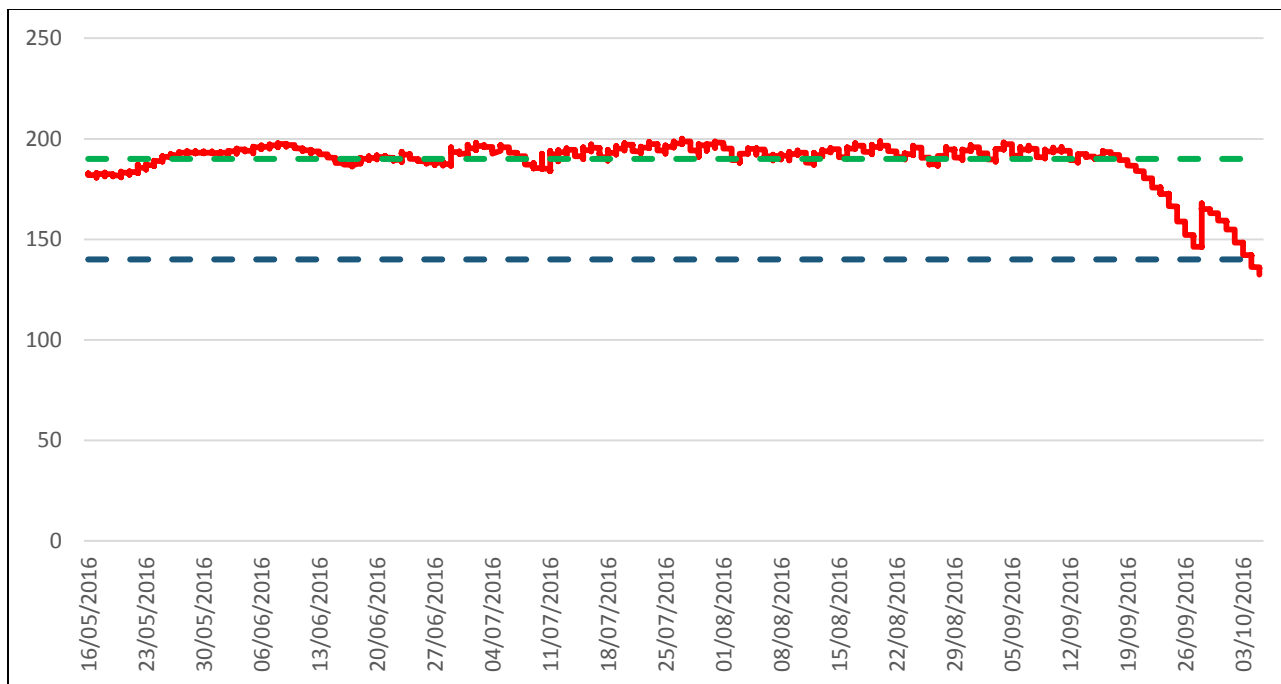
Gráfica 10. Evolución de los niveles de humedad (mm) en T.Coop Sur a distintos niveles de profundidad durante el ciclo del cultivo.



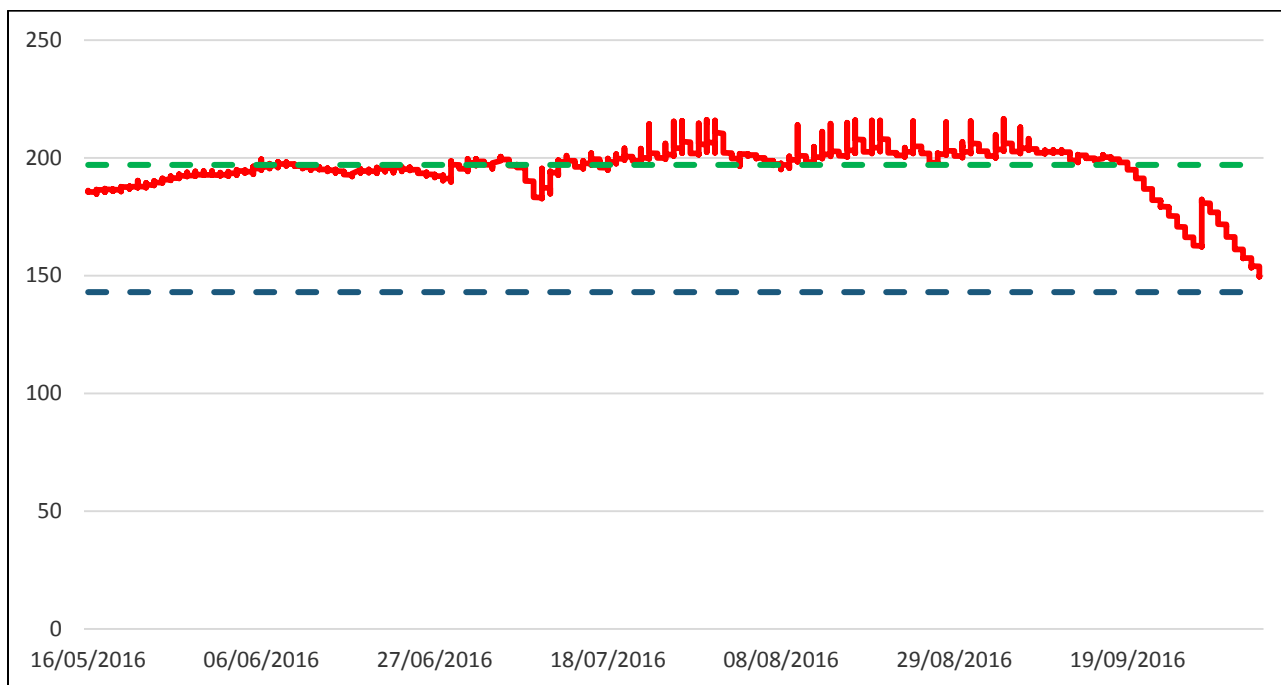
Gráfica 11. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Sur acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad)



Gráfica 12. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Norte acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad)



Gráfica 13. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Norte acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad)



Gráfica 14. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Sur acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad)

Como se puede observar en las gráficas de humedad, T.Coop (Gráfica 13. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Norte acumulados durante el ciclo del cultivo y Gráfica 14. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Coop Sur acumulados durante el ciclo del cultivo) trabajaba continuamente con valores elevados de humedad, manteniendo prácticamente a lo largo de todo el tiempo dicha humedad en valores cercanos a la CC. Aunque aparentemente pueda parecer que existía mucha variación, ésta se da principalmente en los primeros 10 centímetros de suelo, que es la parte que sufre mayores variaciones debido a que es la parte del terreno que más sufre las inclemencias del tiempo.

En cambio, en las gráficas correspondientes a T.Univ (Gráfica 11. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Sur acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad) y Gráfica 12. Evolución de la reserva de agua (mm) en T.Univ Norte acumulados durante el ciclo del cultivo (Línea discontinua superior: Capacidad de Campo; Línea discontinua inferior: Límite del intervalo de humedad)), pueden verse claramente ciclos de consumo de agua y de riego. Estas fluctuaciones son debidas al aprovechamiento de la humedad presente en el suelo que se hacía en cada momento.

5.5 SEGUIMIENTO DEL CULTIVO

Como ya se ha mencionado en el apartado dónde se describen las tareas realizadas en la parcela, el cultivo se sembró el 1 de mayo y durante las primeras semanas de vida, éste tuvo un desarrollo homogéneo en toda la parcela.

A medida fueron pasando las semanas, se pudo apreciar cómo en la parte gestionada por la universidad, una de las zonas sufría un cierto retraso en el desarrollo con respecto al resto de la parcela, por ello se procedió a determinar lo ocurrido en dicha zona.

Tras revisar la información ofrecida por las sondas, se pudo comprobar que el retraso no se debía a una falta de agua en el suelo, ya que mediante las sondas se pudo comprobar que los niveles eran adecuados. Por lo que se procedió a comprobar in situ el estado del suelo en profundidad.

Una vez en la parcela, tras comprobar que en la zona deprimida no había elementos ni vegetación que pudiesen retrasar el desarrollo del cultivo, se procedió a cavar para ver que estaba ocurriendo en profundidad en dicha zona. En ese instante se pudo observar que en el suelo, a una profundidad menor de 30 cm, había encharcamiento, lo que limitaba el desarrollo normal de la zona radicular y, en consecuencia, de toda la planta.



Imagen 14. Comparación de plantas de la zona encharcada y de la zona sin encharcar



Imagen 15. Suelo saturado en la zona radicular de la zona sur del tratamiento T.Univ

Una vez se observó que en T.Univ Sur de la parcela se estaba produciendo el encharcamiento, se procedió a gestionar el riego de manera diferente para así intentar equilibrar las necesidades de la zona norte y sur sin que ninguna de las dos zonas sufriera escasez de agua ni encharcamiento.

Pasadas tres semanas se volvió a comprobar el nivel de desarrollo de esta zona en comparación al resto de la parcela, ya que se tomaron medidas en la gestión del riego para evitar otros posibles problemas de encharcamiento, y, como se puede comprobar (Imagen 16. Diferencias de desarrollo en las distintas partes de la parcela, en la imagen de la izquierda T.Coop y en la derecha T.Univ.), el retraso en el desarrollo que adquirió en un principio lo mantuvo hasta que finalizó el ciclo del cultivo

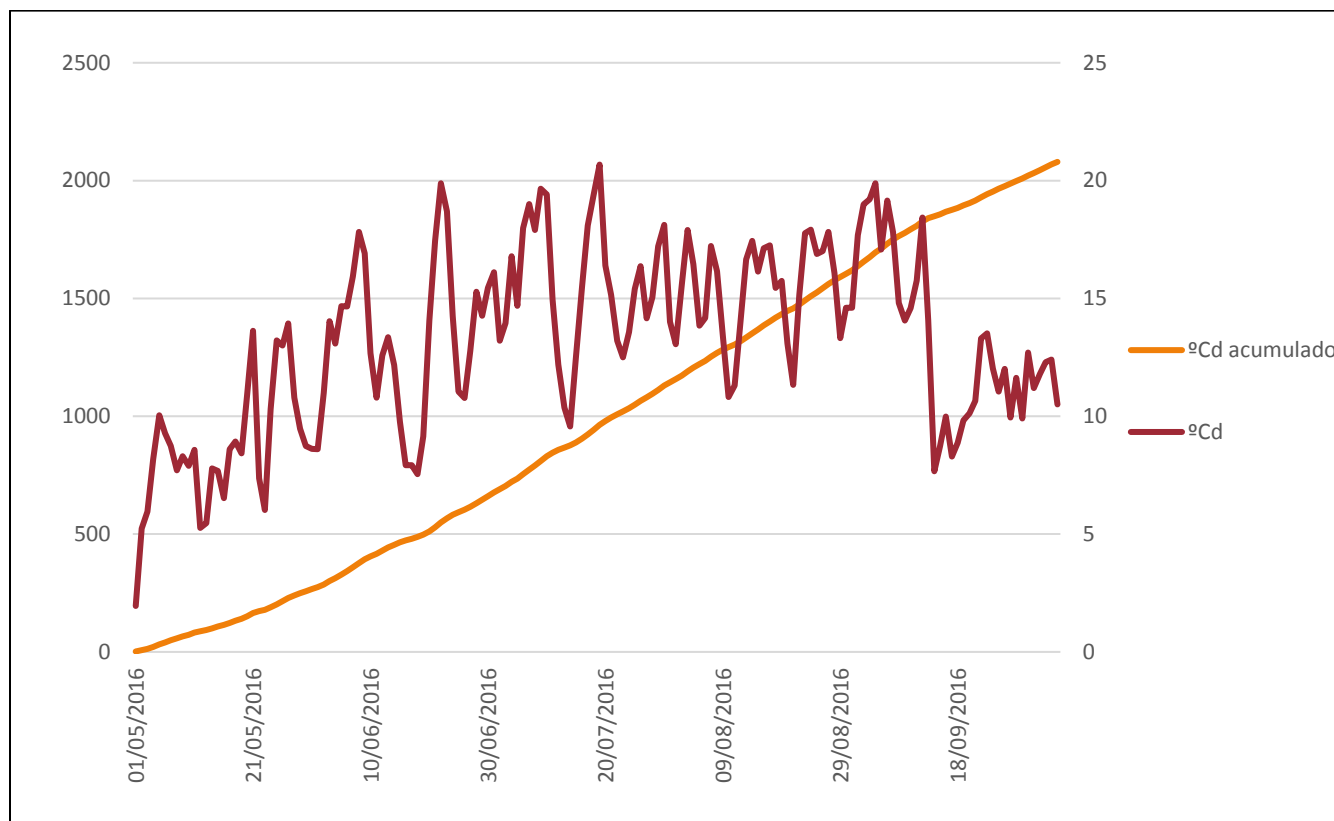


Imagen 16. Diferencias de desarrollo en las distintas partes de la parcela, en la imagen de la izquierda T.Coop y en la derecha T.Univ.

En la imagen puede apreciarse que la tercera planta (comenzando desde la izquierda), que es la correspondiente a la zona T.Univ Sur, tiene una envergadura menor que las demás, concretamente 20 centímetros, a lo que hay que añadirle el retraso fenológico que adquirió desde que comenzó la afección.

A finales del tercer mes de desarrollo del cultivo comenzaron a observarse las primeras sedas que emergían de las mazorcas, lo que situaba a la planta en el estadio VT de desarrollo y la hacía entrar en una de las fases más críticas para el desarrollo de la planta. Desde la aparición de esta fase hasta la finalización de la polinización, el cultivo está en un periodo especialmente delicado, ya que si el cultivo sufre estrés hídrico podría reducirse la viabilidad del polen y de las sedas, lo que podría reducir hasta un 100% la productividad del cultivo (Manejo del riego en el cultivo de maíz, Pioneer).

En la siguiente gráfica (Gráfica 15. Acumulación de calor por parte de la planta ($^{\circ}\text{Cd}$). Eje izq.: acumulación total; Eje dcha.: acumulación diaria) puede apreciarse cómo evoluciona la acumulación de grados día por parte del cultivo. Al tratarse de un maíz de ciclo 500 el ciclo de desarrollo del cultivo finaliza cuando este alcanza un total de entre 2000 y 2075 $^{\circ}\text{Cd}$ (grados de calor día).



Gráfica 15. Acumulación de calor por parte de la planta ($^{\circ}\text{Cd}$). Eje izq.: acumulación total; Eje dcha.: acumulación diaria

Los días previos a que se completara el ciclo del cultivo comenzó a hacerse visible uno de los indicadores de madurez que presenta este tipo de plantas, es la capa negra (Imagen 17. Capa negra del maíz) que aparece en el punto de inserción de la semilla con el raquis (Paliwal *et al.*, 2001). Esto indicaba que el fin del ciclo de cultivo se aproximaba y que la fase del llenado del grano llevaba a su final. La fecha en la que se alcanzó la madurez en toda la parcela fue alrededor del 5 de octubre de 2016.



Imagen 17. Capa negra del maíz

Una vez pasada la madurez fisiológica del cultivo solo quedó esperar a que éste redujese los niveles de humedad hasta el valor recomendado por la empresa destinataria a partir del cual se podía llevar a cabo la cosecha del cultivo.

Durante el desgrane pudo observarse que en las mazorcas recogidas en T.Coop había una mayor presencia de larvas de taladro del maíz (*Ostrinia nubilalis*) y de podredumbres en la mazorca. En la siguiente imagen pueden verse ambas afecciones en una misma mazorca (Imagen 18. Mazorca afectada por podredumbre y taladro).



Imagen 18. Mazorca afectada por podredumbre y taladro

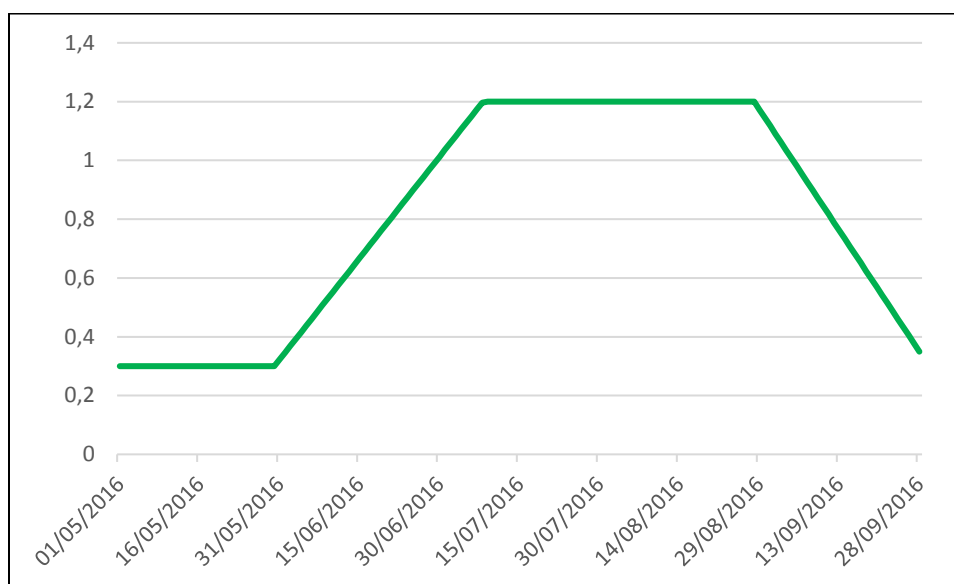
5.6 COMPARACIÓN DE LAS PROGRAMACIONES DE RIEGO CON OTROS TRATAMIENTOS

A lo largo de la experimentación se determinaron una serie de valores que tomar como referencia para así poder evaluar si se estaba llevando a cabo la experimentación de forma adecuada en cuanto a las necesidades hídricas del cultivo.

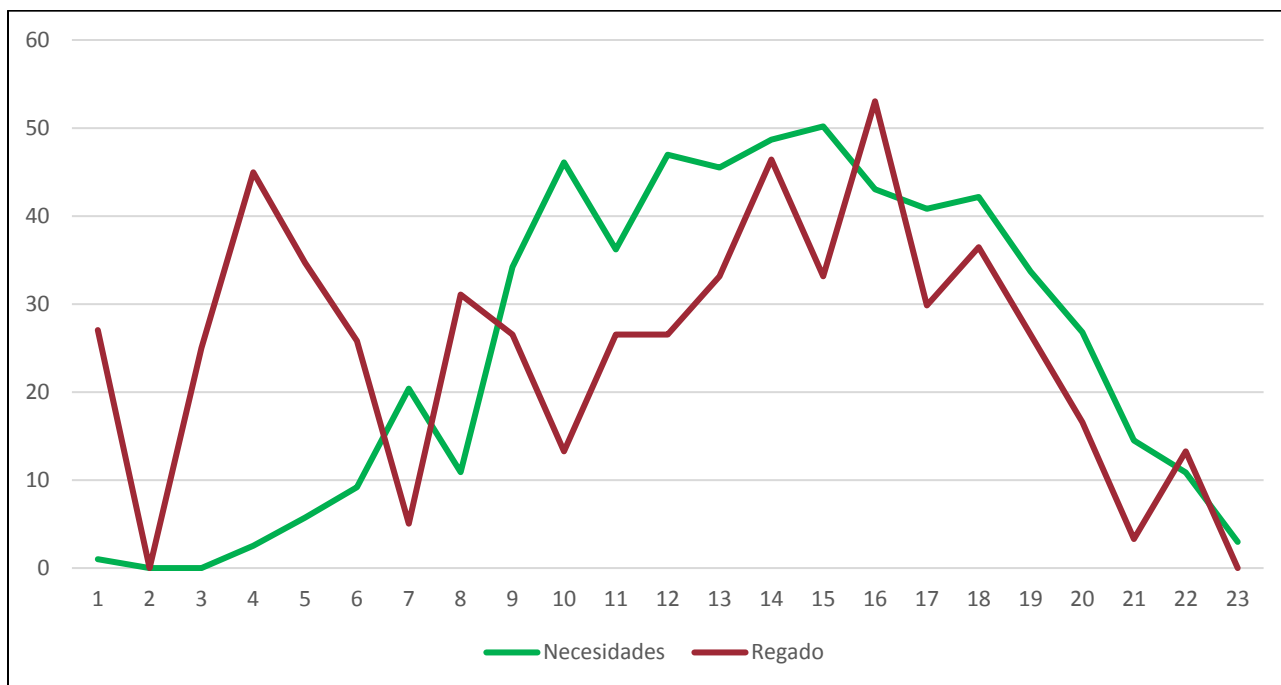
5.6.1 ETP calculada

Se calculó la ETP del cultivo para valorar si la cantidad de agua aplicada al cultivo es la suficiente para las distintas necesidades que tiene el cultivo en los distintos momentos de desarrollo. Para ello, haciendo uso del documento de FAO 56 se establecieron los momentos de desarrollo del cultivo según se indica en dicho documento y los valores de K_c que se establecen para cada fase del desarrollo en la zona en la que se encuentra la parcela.

En la siguiente gráfica (Gráfica 16. Evolución del valor K_c durante el periodo de desarrollo del cultivo) se puede ver cómo evolucionó el coeficiente de K_c a lo largo del periodo de tiempo que el cultivo estuvo implantado en la parcela:



Gráfica 16. Evolución del valor K_c durante el periodo de desarrollo del cultivo

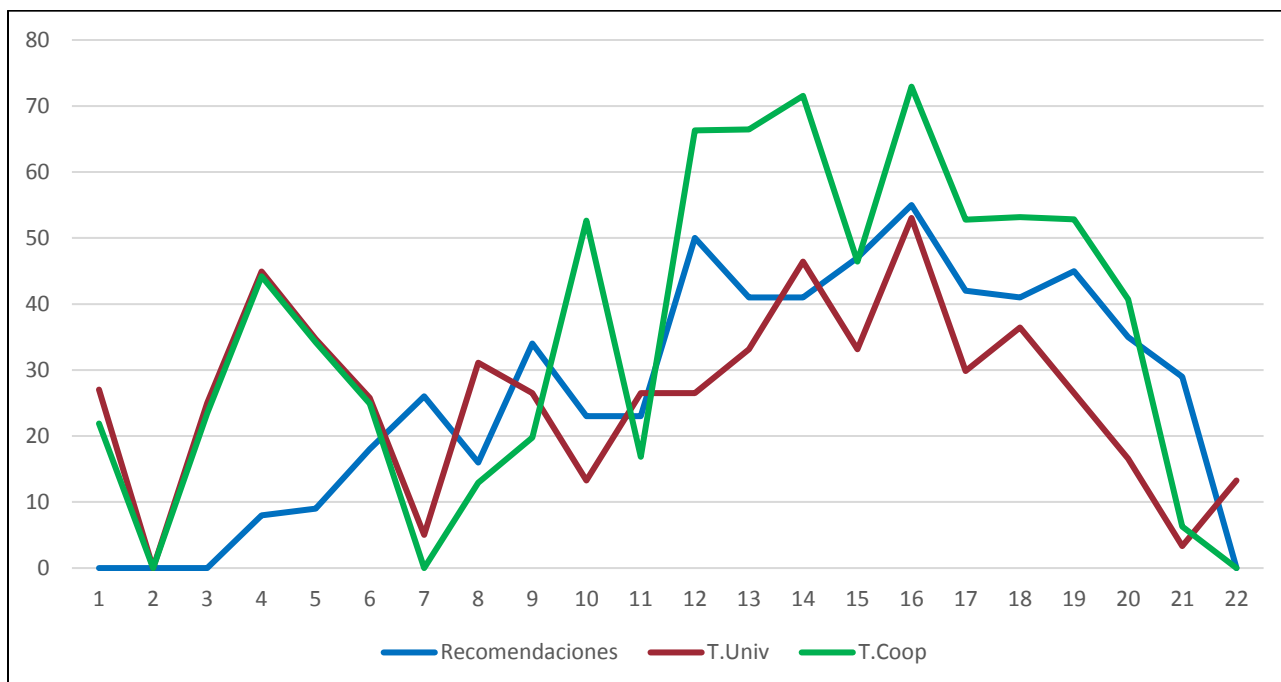


Gráfica 17. Comparación semanal de la ET_c y las dosis de agua aportadas en riegos (mm) (Eje horizontal: semanas desde la siembra)

Esta variación de K_c se ve reflejada en las necesidades hídricas del cultivo, que tuvo el periodo de máximas necesidades coincidiendo con el periodo de K_c máximo. En cuanto a las necesidades de ET_c , éstas tuvieron un valor de 572 l/m^2 , lo que se asemeja en gran medida a los 578 l/m^2 aplicados en riegos por parte de la universidad.

5.6.2 Comparación de las dosis de riego aplicadas

En el siguiente gráfico (Gráfica 18. Comparación semanal de las dosis de riego aportadas por la Cooperativa, por la Universidad y las recomendaciones del SAR de INTIA (mm)) se puede observar la dosis de riego aplicada en T.Univ comparada con las dosis de riego de referencia (SAR) y las dosis de riegos aplicadas en T.Coop determinadas por la persona encargada de gestionar el riego:



Gráfica 18. Comparación semanal de las dosis de riego aportadas por la Cooperativa, por la Universidad y las recomendaciones del SAR de INTIA (mm) (Eje horizontal: semanas desde la siembra)

Como se puede observar en la gráfica anterior (Gráfica 18. Comparación semanal de las dosis de riego aportadas por la Cooperativa, por la Universidad y las recomendaciones del SAR de INTIA (mm)), las primeras semanas del manejo del riego, T.Univ se comporta de igual manera a T.Coop debido a la gestión conjunta de las zonas. A partir de la séptima semana, se puede observar cómo las rectas se disocian. Esto fue debido a que la universidad tomó el control de T.Univ.

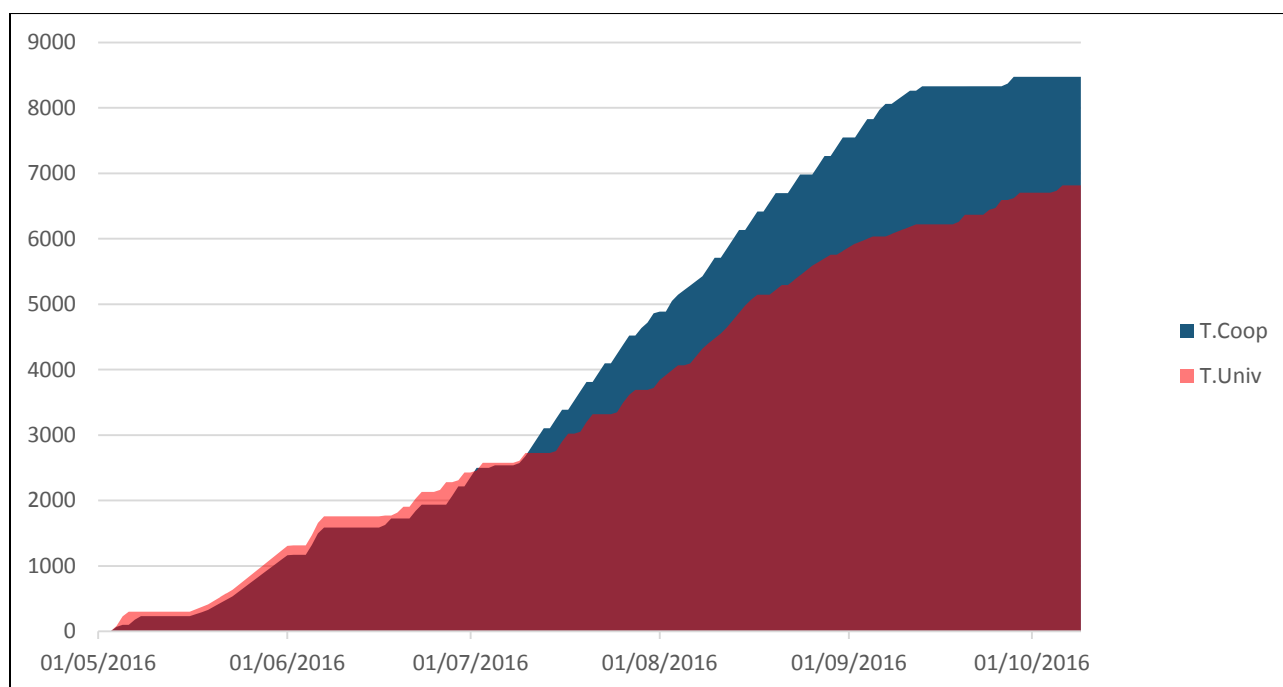
Durante las primeras semanas (3 y 4) se dan unas dosis de riego de T.Coop y T.Univ fueron superiores a las recomendaciones del SAR debido a que se aplicaron una serie de riegos de nascencia para facilitar el desarrollo inicial del cultivo.

Al poco tiempo, en la semana 8, se produce otro pico por encima de las recomendaciones del SAR, esta vez solo por parte de T.Univ, debido a que se regó en exceso para poder determinar los valores de capacidad de campo del suelo de la parcela del estudio.

Se puede apreciar en la gráfica (Gráfica 18. Comparación semanal de las dosis de riego aportadas por la Cooperativa, por la Universidad y las recomendaciones del SAR de INTIA (mm)) que la cantidad de agua aplicada en el cultivo fue muy similar a las recomendaciones que INTIA da semanalmente a los agricultores para la zona de Artajona, aunque por lo general se sitúan por debajo de dichos valores. Además, en cuanto a las necesidades de riego totales determinadas por el SAR para este periodo (583 mm) T.Univ registró valores de riego muy similares a las recomendaciones, obteniéndose un valor de 578 mm.

También se puede ver que las dosis de los riegos realizados en T.Univ son muy inferiores, por lo general, a los realizados por T.Coop desde el momento en que se disoció la gestión del riego, dándose lugar una reducción del consumo total de agua de los 780 mm en T.Coop a una dosis de 578 mm en T.Univ.

Estas diferencias en las dosis de riego de T.Coop y T.Univ directamente desembocan en una diferencia en el consumo total de agua de la parcela. A continuación se muestra una gráfica que representa la evolución del consumo de agua de los dos hidrantes presentes en la parcela:



Gráfica 19. Evolución del consumo de agua (m^3) de los tratamientos T.Coop y T.Univ por hectárea

Tabla 11. Consumo de agua de los hidrantes por hectárea

	T.Univ (m^3 /ha)	T.Coop (m^3 /ha)
Tales	6815,2	8328,9
Mayo	1233,1	1095,8
Junio	1195,5	1120,0
Julio	1291,8	2644,7
Agosto	2091,2	2686,4
Septiembre	892,0	781,9

Octubre	111,7	0,0
----------------	-------	-----

En la gráfica anterior se puede observar cómo aproximadamente a partir de la séptima semana, cuando la universidad tomó el control del riego del hidrante B (T.Univ), el consumo registrado en dicho hidrante tiene unos incrementos menores y dicho consumo permanece por debajo durante el resto de la experimentación. En la tabla anterior (Tabla 11. Consumo de agua de los hidrantes por hectárea), además puede verse cómo el consumo de agua difiere más de 1.500 m³/ha entre los distintos tratamientos de la parcela al finalizar la experimentación.

Que en T.Coop se realizaran unos riegos mayores a los recomendados supuso un consumo de un 22,2% más que la parte de T.Univ, lo que, asumiendo un precio de 0,04 €/m³ de agua de riego suministrada por el canal, supondría un ahorro de alrededor de 60 € por hectárea, lo que para la totalidad de la parcela supondría un ahorro de unos 600 €.

5.7 ESTADO DEL SUELO

Durante las primeras fases del cultivo se observaron, como ya se ha descrito, problemas en el desarrollo de éste en una de las zonas. Este hecho hizo visibles ciertos problemas que de otra manera podrían haber pasado inadvertidos.

Uno de los problemas que presentó el suelo fue la tendencia al agrietamiento que tiene en las épocas en las que los niveles de humedad bajaban. Esto dificultó la correcta lectura de las sondas, ya que éstas han de estar en contacto directo con el suelo para poder hacer una buena lectura. Otro de los problemas que ocasionó esto fue la creación de flujos preferenciales dentro del suelo, lo que además de interferir con el correcto funcionamiento de las sondas, producía una incorrecta absorción de agua por parte del suelo y favorecía la percolación. Como se puede ver a continuación, las grietas podían alcanzar profundidades de hasta 30 centímetros (Imagen 21. Agrietamientos subsuperficiales).



Imagen 19. Grietas superficiales



Imagen 20. Eliminación de grietas superficiales



Imagen 21. Agrietamientos subsuperficiales

También se observó que en los primeros 30 cm de suelo el cultivo enraizó con cierta facilidad, pero al superar dicha profundidad, la presencia de raíces era muy reducida. Por ello se llevó a cabo una toma de muestras para determinar los valores de densidad del suelo y ver si la compactación podía ser el factor que originaba la reducida presencia de raíces.

Debido a los valores de densidad obtenidos y a las observaciones realizadas en la parcela, se ha podido determinar que existe una cierta compactación a poca profundidad, lo que condiciona el desarrollo de las raíces y de la infiltración del agua (soilquality.org.au, 2016). Dicha compactación se hacía patente a partir de los 30 cm de profundidad. Esto pudo ser debido a la suela de labor que origina el rotocultor sumado a la compactación que originan los sucesivos riegos.

Como se ha dicho, se produce una limitación en lo que al desarrollo radicular se refiere, por lo que el volumen de suelo explorado se reduce. Esto conlleva una reducción en la capacidad potencial de nutrientes y de agua disponibles, lo que puede limitar el desarrollo del cultivo, y como consecuencia, la productividad final de éste.

5.8 RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Debido a que la cosecha se demoró mucho en el tiempo, ya que el nivel de humedad del grano que se quería era relativamente bajo, se decidió programar una cosecha previa para que no se demorase mucho en el tiempo la experimentación.

Ya que, aunque se realizó el seguimiento del riego y del desarrollo del cultivo en toda la parcela, se decidió realizar la cosecha en las partes en las zonas en las que principalmente se centró la experimentación, que son las zonas de los alrededores de las sondas.



Imagen 22. Estado de la parcela en el momento de la cosecha

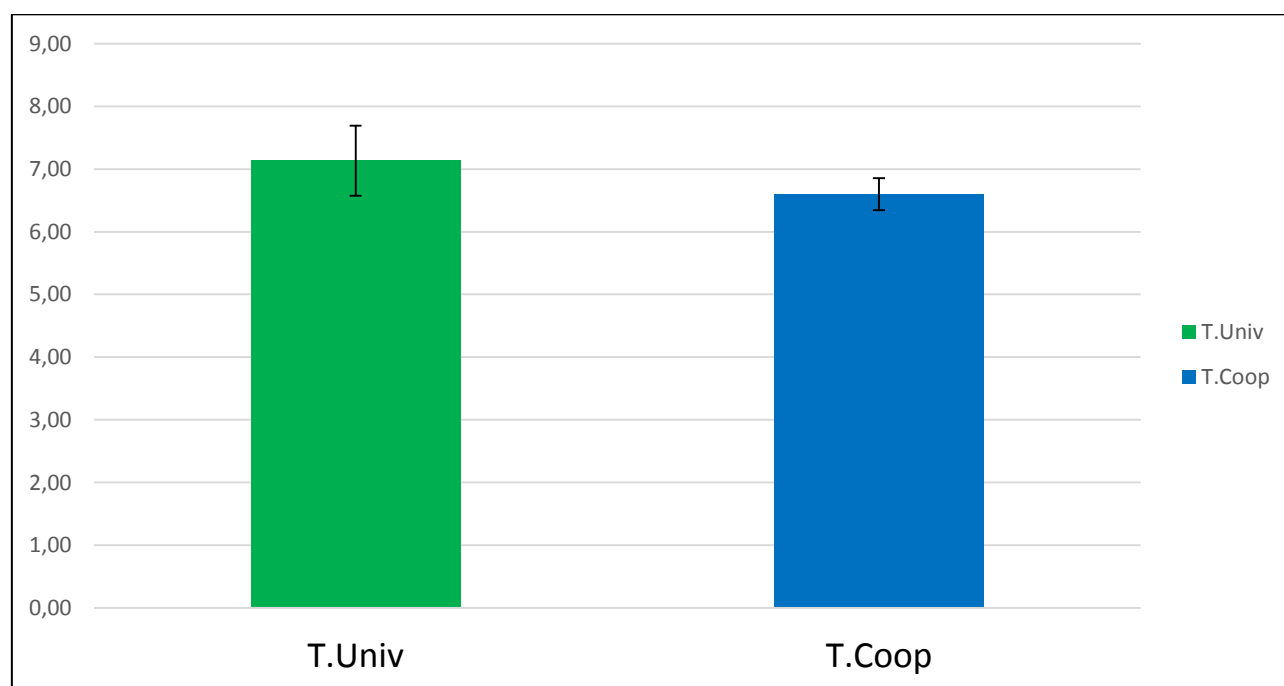
Una vez realizados estos análisis, con una máquina contadora de granos se separaron cien granos de cada una de las muestras y se pesaron esos cien granos. Una vez se obtuvo el peso, éste se multiplicó por diez para así determinar el peso de mil granos (PMG). Éste es un indicador de rendimiento del cultivo que sirve para valorar el potencial productivo del propio grano.

Tabla 12. Resultados de la cosecha

Zona	PMG medio (gr)	Promedio Peso Recolectado (kg)	Hileras	Granos/hilera	Peso esp. (kg/hl)	% Humedad
T.Univ Sur	417	6,67	16,7	37,3	61,70	31,93
T.Univ Norte	397	7,60	16,3	41,3	63,33	29,57
T.Coop Norte	380	6,47	16,0	38,0	62,77	29,37

T.Coop Sur	373	6,73	16,7	41,3	62,20	28,63
T.Univ	407	7,13	16,5	39,3	62,5	30,8
T.Coop	376	6,60	16,3	39,7	62,5	29,0

En lo que a productividad se refiere, T.Univ presenta unos valores medios superiores a los de T.Coop dándose el valor máximo en la zona norte. Los valores productivos indicados en la tabla son referentes a una superficie de 3,57 m², lo que resultaría en una productividad de 19.981 y 18.487 kg/ha para T.Univ y T.Coop respectivamente. Si se normalizan estos valores a un 14% de humedad resultan unos valores de cosecha de 15.391 hg/ha para T.Univ y 14.597 kg/ha T.Coop.



Gráfica 20. Diferencias productivas de las muestras recogidas entre los tratamientos (kg)

En cuanto a PMG, hileras y humedad, T.Univ presenta valores mayores, siendo éstos máximos en la zona sur, salvo para las hileras que son mayores en la zona norte. El número de granos por hilera es mayor en T.Coop siendo máximo en la zona sur y el peso específico es igual para ambos tratamientos.

Una vez conocidos los resultados se realizaron análisis de la varianza de las distintas características anteriormente indicadas y se concluyó en que no existían diferencias significativas en ninguna de ellas. El único hecho remarcable es la tendencia ascendente que denotaba T.Univ en lo que a productividad se refiere con respecto a T.Coop.

6. CONCLUSIONES

1. Gracias a las constantes lecturas de humedad que realizaron las sondas a lo largo de la experimentación fue posible realizar un seguimiento de la humedad del suelo en las distintas repeticiones de los tratamientos a lo largo de la experimentación. Además, estas sondas ayudaron a detectar problemas de encharcamiento, lo que permitió establecer una nueva gestión del riego para contrarrestar estos problemas en el desarrollo del cultivo.
2. Se pudo observar a lo largo de la experimentación que el cultivo en ambos tratamientos no tuvo variaciones significativas en cuanto al desarrollo en toda la parcela, salvo en los puntos localizados en los que se dieron ciertos problemas de encharcamiento.
3. Se ha visto que las sondas aportan valores de gran utilidad para la gestión del riego aunque sea en términos relativos de humedad, pero si se quiere conocer las lecturas exactas de humedad las sondas deben estar correctamente calibradas.
4. Las dosis de riego aplicadas se han ajustado en gran medida a la dosis y los momentos de riegos recomendados.
5. El consumo de agua de T.Coop se pudo reducir más de un 20% con respecto a T.Univ obteniendo niveles productivos similares. A este ahorro de agua hay que sumarle el ahorro económico que tiene asociada esta reducción del consumo.
6. No se observaron diferencias significativas para ninguno de los parámetros de la cosecha analizados (PMG, productividad, hileras, granos por hilera, peso específico y humedad).

7. REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Sentek Pty. Ltd, (2011). Calibration Manual for Sentek Soil Moisture Sensors, Revision 2.

- Soilquality.org.au. (2016). Bulk Density - Measurement, Fact Sheets [online] Disponible en: <http://soilquality.org.au/factsheets/bulk-density-measurement> [Accedido 10 Dic. 2016].
- FAO (1993). El maíz en la nutrición humana.
- GRDC (2014). Grow Notes: Maize, Diciembre 2014.
- Mapama.gob.es. (2016). Material vegetal - Ministerio - magrama.gob.es. [online] Disponible en: <http://www.mapama.gob.es/app/materialvegetal/fichamaterialvegetal.aspx?idficha=1180> [Accedido el 10 Dic. 2016].
- Gabriel, J. L., Lizaso, J. I., & Quemada, M. (2010). Laboratory versus field calibration of capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 593-601.
- Gasque, M., Granero, B., Martí, P., Turégano, J. V., & Altozano, P. G. (2011). Sondas de humedad FDR como herramienta de apoyo en la programación del riego. *Agricultura: Revista agropecuaria*, (941), 396-400.
- Valero, R. M., García, M. I., Báez, M. D., & González, A. P. (2009). Estimación del consumo de agua en el cultivo del maíz, mediante el seguimiento de humedad en la zona radicular con sondas de capacitancia (FDR).
- LabFerrer (2016). Calibración de Sensores Capacitivos
- Fernández, J. M., Pérez, J. M. S., & Cammeraat, L. H. (1994). La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR (Time Domain Reflectometry): Estado del arte y ejemplos de aplicación. *Investigación en zona no saturada: aspectos metodológicos y algunos ejemplos*, 2, 17.
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). *SSSA Book Series: 5 Methods of Soil Analysis Ch2*, Ed. Dane JH, Clarke Topp G. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- INTIA (2007). Claves de Cultivo del Maíz Dulce
- Paliwal, R. L., Granados, G., Lafitte, H. R., Violic, A. D., & Marathée, J. P. (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción (No. 28). Food & Agriculture Org..

8. ANEJOS

8.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Para poder llevar a cabo la calibración de la sonda, es necesario conocer los valores de humedad reales en cada una de las zonas en las que están colocadas las sondas y a las distintas profundidades a las que se encuentran los sensores.

8.1.1 Densidad del suelo

Para poder determinar la humedad volumétrica del suelo, primero hay que determinar la densidad aparente de éste. Para ello se tomaron cinco muestras de suelo a distintas profundidades (20 cm y a 40 cm) en un radio inferior a 5 metros desde cada sonda.

Para tomar las muestras se usaron unos cilindros metálicos que tienen un volumen de 100 cm³, una pala para cavar los agujeros en los que tomar las distintas muestras y una maza de goma con la que clavar el cilindro en el suelo para tomar la muestra.



Imagen 23. Toma de muestras de densidad

Con estos valores, será posible determinar las distintas densidades que presenta el suelo a distintas profundidades, ya que al ejercer el propio suelo presión en las capas inferiores debido a su propio peso, ocasiona que se den distintos valores de densidad.

A continuación se muestran los distintos valores de densidad de las distintas muestras de suelo tomadas en las distintas zonas de la parcela en las que están situadas las sondas:

Tabla 13. Valores de densidad de las distintas zonas de la parcela (gr/cm³)

Repeticiones	T.Univ Sur	T.Univ Norte	T.Coop Norte	T.Coop Sur
1	1,57	1,62	1,69	1,43
1	1,72	1,67	1,72	1,48
2	1,47	1,74	1,67	1,51
2	1,72	1,73	1,66	1,53
3	1,42	1,63	1,62	1,31

3	1,70	1,71	1,67	1,58
4	1,25	1,68	1,54	1,64
4	1,55	1,71	1,59	1,68
5	1,50	1,76	1,59	1,58
5	1,64	1,67	1,60	1,71

Debido a la variabilidad que presentaban los distintos valores se realizó un análisis estadístico de las distintas muestras para comprobar si dichos valores atípicos podían ser debidos a errores cometidos durante la toma de las muestras. Una vez se obtuvo el resultado se pudo determinar que los valores obtenidos, organizados en profundidad superior e inferior, formaban parte de distintas poblaciones y que los valores de cada profundidad formaban parte de la misma población. Obtener dichos resultados permitió determinar una densidad media para toda la parcela para las distintas profundidades analizadas, así como un coeficiente de variación (CV) para cada una de las medias obtenidas.

Tabla 14. Valores medios de densidad y CV de las medias de densidad de los perfiles de profundidad del suelo

	Medias de densidad	Coeficientes de Varianza
0-30 cm	1,56	10
30-50 cm	1,65	5

Los CV que se han determinado han sido mayorados para cubrir los casos en los que haya podido llevarse a cabo un error a la hora de tomar las muestras, por lo que así se asegura que la variación del valor medio puede ser mayor que la que realmente se ha calculado.

8.1.2 Humedad gravimétrica calculada

Por ello el primer de los pasos fue determinar la humedad gravimétrica presente en las distintas zonas en las que estaban instaladas las sondas. Por lo que se procedió a desplazarse a la parcela para así poder determinar la cantidad de agua presente en el suelo y así ser capaces de comparar los valores que muestran las sondas con la humedad real del suelo.

Para la determinación de la humedad gravimétrica se realizaron varios muestreos en las zonas adyacentes a las sondas. Estos muestreos fueron realizados además a distintas profundidades, concretamente cada 10 cm hasta los 50 cm de profundidad. En la parcela se cavaron una serie de hoyos próximos a las ubicaciones de las sondas, de los que se extrajeron las distintas muestras y se depositaron en unos recipientes metálicos que permitieron su transporte.



Imagen 24. Materiales utilizados para la toma de muestras de humedad

Una vez recogidas, las muestras fueron llevadas al laboratorio donde se pesaron, se introdujeron en la estufa y se les sometió a un tratamiento de calor, a 110 °C durante 24 horas. Pasado este periodo de tiempo se volvieron a pesar las muestras para así poder determinar la humedad gravimétrica de las distintas muestras.

$$W = \frac{Ma}{Ms}$$

Dónde:

W: humedad gravimétrica

Ma: Masa de agua presente en el suelo

Ms: Masa de suelo seco

Tabla 15. Valores de humedad gravimétrica de las distintas muestras recogidas (gr). Profundidad (cm)

Tratamiento	Profundidad	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
T.Univ Sur	10	17,91	13,93	14,33	14,57	14,54
T.Univ Sur	20	16,87	13,48	12,45	14,63	13,79
T.Univ Sur	30	17,67	13,55	11,09	12,46	12,89
T.Univ Sur	40	16,29	14,26	11,41	12,79	12,95
T.Univ Sur	50	16,73	12,95	11,73	16,62	12,32
T.Univ Norte	10	19,06	14,86	14,16	13,86	14,66
T.Univ Norte	20	19,25	15,20	15,11	14,08	12,83
T.Univ Norte	30	15,65	12,92	12,80	12,03	13,30
T.Univ Norte	40	16,13	13,01	11,57	12,49	13,25
T.Univ Norte	50	16,68	12,84	11,98	13,40	13,32
T.Coop Norte	10	25,75	17,86	14,15	17,84	14,70
T.Coop Norte	20	23,59	17,10	12,94	20,03	13,92
T.Coop Norte	30	20,20	12,61	13,30	15,57	13,69
T.Coop Norte	40	20,97	14,60	14,77	15,48	14,20
T.Coop Norte	50	20,54	16,74	15,21	15,52	14,56
T.Coop Sur	10	23,45	18,75	12,86	13,52	14,11
T.Coop Sur	20	26,31	16,38	11,88	15,65	15,28
T.Coop Sur	30	19,74	14,66	14,49	12,90	14,56
T.Coop Sur	40	20,31	16,24	14,58	14,24	15,39
T.Coop Sur	50	21,25	16,96	15,78	15,41	15,81

8.1.3 Humedad volumétrica

La humedad volumétrica es el valor que permitirá conocer la cantidad de agua en el suelo en relación al volumen aparente de este. Estos valores que se calculan son los que se compararon para poder determinar si los valores aportados por las sondas son válidos o no.

Tabla 16. Valores de humedad volumétrica de las distintas muestras recogidas (mm). Profundidad (cm)

Tratamiento	Profundidad	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

T.Univ Sur	10	27,96	21,75	22,36	22,74	22,70
T.Univ Sur	20	26,33	21,05	19,43	22,83	21,53
T.Univ Sur	30	27,58	21,14	17,32	19,45	20,12
T.Univ Sur	40	26,89	23,54	18,83	21,11	21,38
T.Univ Sur	50	27,62	21,38	19,36	27,43	20,34
T.Univ Norte	10	29,74	23,19	22,10	21,63	22,89
T.Univ Norte	20	30,05	23,73	23,59	21,98	20,03
T.Univ Norte	30	24,43	20,17	19,98	18,78	20,76
T.Univ Norte	40	26,63	21,47	19,11	20,61	21,88
T.Univ Norte	50	27,54	21,20	19,78	22,12	21,99
T.Coop Norte	10	40,20	27,87	22,09	27,85	22,94
T.Coop Norte	20	36,83	26,68	20,20	31,26	21,73
T.Coop Norte	30	31,53	19,68	20,76	24,31	21,36
T.Coop Norte	40	34,62	24,10	24,38	25,56	23,45
T.Coop Norte	50	33,91	27,64	25,12	25,63	24,04
T.Coop Sur	10	36,60	29,27	20,07	21,11	22,02
T.Coop Sur	20	41,07	25,57	18,55	24,42	23,85
T.Coop Sur	30	30,82	22,89	22,62	20,14	22,73
T.Coop Sur	40	33,53	26,82	24,07	23,51	25,41
T.Coop Sur	50	35,08	28,00	26,05	25,45	26,11

8.2 ESTADOS FENOLÓGICOS

A continuación se presentan las fechas en las que se alcanzaron los distintos estados fenológicos del cultivo de estudio:

Tabla 17. Fechas de los estados fenológicos del cultivo

Estado fenológico	Morfología	Fecha
VE	Emergencia	17 mayo
V 1	1ª hoja	25 mayo
V 2	2ª hoja	30 mayo

V 4	4ª hoja	12 junio
V 6	6ª hoja	19 junio
V 10	10ª hoja	8 julio
V 14	14ª hoja	24 julio
V T	Floración	31 julio
R 1	Aparición de sedas	2 agosto
R 2	Ampolla	9 agosto
R 3	Lechoso	26 agosto
R 4	Pastoso	3 septiembre
R 5	Dentición	12 septiembre
R 5.25	Dentición	17 septiembre
R 5.50	Dentición	25 septiembre
R 5.75	Dentición	1 octubre
R 6	Madurez	8 octubre